

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

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – РТФ  
КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
кандидат технических наук,  
доцент В.Г. Коберниченко

Екатеринбург

2023

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>4</b>
<b>1 ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ</b>	<b>11</b>
1.1 Состояние и тенденции развития современных космических систем радиолокационного зондирования Земли .....	11
1.2 Принципы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой. Этапы обработки .....	13
1.3 Источники ошибок абсолютной фазы .....	26
1.4 Аналитический обзор методов развёртывания интерферометрической фазы .....	30
1.5 Проблематика оценивания эффективности этапов интерферометрической обработки данных космических РСА .....	38
1.6 Выводы по главе 1 .....	42
<b>2 МЕТОД РАЗВЁРТЫВАНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ</b>	<b>45</b>
2.1 Математическая модель интерферометрической фазы и её разрывов .....	45
2.2 Развёртывание фазы методом выравнивания встречного вихревого поля.....	50
2.3 Алгоритмы, реализующие предложенный метод.....	58
2.4 Оценка точности восстановления абсолютной фазы предложенным методом .....	63
2.5 Выводы по главе 2 .....	71
<b>3 МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭТАПОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b>	<b>74</b>
3.1 Проблемы интерпретации цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии. Требования к тестовому участку .....	74
3.2 Метод преобразования эталонных высот .....	79
3.3 Методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы .....	88
3.4 Методика оценивания эффективности подавления фазового шума .....	89
3.5 Методика сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар .....	90

3.6 Выводы по главе 3 .....	94
<b>4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b>	<b>95</b>
4.1 Характеристики данных.....	95
4.2 Оценка точности предложенного алгоритма развёртывания фазы.....	97
4.3 Сравнительная оценка методов развёртывания фазы.....	103
4.4 Сравнение способов оценивания когерентности интерферометрических пар.....	112
4.5 Оценивание эффективности подавления фазового шума .....	114
4.6 Выводы по главе 4 .....	122
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>124</b>
<b>Литература</b>	<b>127</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [1] и WorldDem [2] стало возможным говорить о появлении информационной технологии космической радиолокационной интерферометрии [3]. 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 [4]. 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 радио-

локационной 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 [5, 6], Е.А. Ксенофонтова [7], А.И. Захарова [8, 9], А.И. Баскакова [10, 11, 12, 13, 14], В.О. Михайлова [15, 16, 17], М.И. Бабокина [18, 19, 20], Л.Б. Неронского [21], Б.Г. Кутузы [22, 23], О.В. Горячкина [22, 24], И.В. Елизаветина [7], И.Ф. Купряшкина [25], А.А. Феоктистова [26, 27], А.В. Ксендука [22], В.В. Кострова [28, 29], Э. Родригеза [30, 31] (США), Р. Бамлера [32, 33] (ФРГ), Р.Ф. Ханссена [34] (Нидерланды), Ф. Рокка [35] (Италия), П. Розена (США), С. Мэдсена [36, 37, 30] (Дания) и др. В области развития методов интерферометрической обработки, в первую очередь — методов развёртывания фазы, основные результаты получены в работах Р.И. Шувалова [38, 39, 40], М.А. Егошкина [41], А.В. Филатова [42], Р. Голдштейна [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52] (США), Г. Цебкера [53, 36, 47, 51, 52, 54, 55] (США), М. Константины [56] (Италия), Дж. Форнаро [57, 58] (Италия), К. Чена [55, 59] (США), С. Томиоки [60, 61, 62] (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 количе-

ства 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 научные 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 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 исполь-

зуются 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 2 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, и 15 статей в изданиях, индексируемых международными цитатно-аналитическими базами данных Scopus и/или Web of Science, а также 14 прочих работ.

**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.

**ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

*Проанализированы тенденции развития и проблемные вопросы современных космических радиолокационных систем ДЗЗ. Проведён обзор методов интерферометрической обработки радиолокационных сигналов, в частности — методов подавления фазового шума и методов развёртывания фазы, рассмотрены источники ошибок восстановления абсолютной фазы и способы оценивания её точности. Показано, что существующие методы развёртывания фазы имеют либо низкую точность восстановления абсолютной фазы, либо большую вычислительную сложность, что осложняет их использование при обработке интерферограмм большого размера. В результате аналитического обзора литературы подтверждена актуальность темы, сформулированы и уточнены цель и задачи исследования.*

**1.1 Состояние и тенденции развития современных космических систем радиолокационного зондирования Земли**

Использование когерентных радиолокационных систем землеобзора авиационного и космического базирования с синтезированием апертуры для получения оперативной информации о состоянии и динамике объектов на поверхности Земли берёт своё начало в конце 1950-х гг. [21, 29] и связано с работами, проводившимися в США и СССР под руководством К.А. Уайли [65, 66], А.П. Реутова [21, 67], Г.С. Кондратенкова [21, 68, 69], П.О. Салганика [21, 70] и др. Когерентная обработка сигнала наряду с высоким пространственным разрешением радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) привели к появлению в 1970-х — 1990-х гг. к появлению нового направления в дистанционном зондировании Земли — радиолокационной интерферометрической съёмки (РСА-интерферометрии, InSAR), позволяющей решать задачи построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности и карт изменений рельефа.

Радиоинтерферометрические методы и ранее (в 1950-х — 1960-х гг.) успешно применялись в радиоастрономии для исследований (в том числе — для построения рельефов) Луны и ближайших планет Солнечной системы [5, 6, 43, 44, 45, 46], однако с развитием в 1960-х гг. технологии радиолокационного апертурного синтеза, а также радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами [71], позволивших получать интерференционные

картины земной поверхности используя только один приёмник, радиолокационные методы стали востребованными и в задачах исследования земной поверхности [48, 49, 47, 72]. Также были проведены эксперименты по возможности применения радиолокационной интерферометрической съёмки с продольной базой для наблюдения за океаническими течениями (AT-InSAR) [50, 73] и радиолокационной интерферометрической съёмки с повторным проходом для обнаружения малых изменений рельефа [51] — дифференциальной интерферометрии (DInSAR). Развитие и внедрение метода постоянных отражателей для дифференциальной интерферометрической съёмки (PS DInSAR) позволило широко применять её результаты при мониторинге работ на месторождениях по добыче полезных ископаемых и состояния транспортных сетей [74, 75, 76]. Широкое применение в PCA-интерферометрии нашли данные, получаемые радиолокаторами PALSAR аппаратов ALOS-1 и ALOS-2, которые благодаря использованию *L*-диапазона для зондирующего сигнала оказались менее подвержены пространственной и временной декорреляции по сравнению с системами более высоких частот [29].

Исходя из анализа публикационной активности [77] можно выделить следующие тенденции развития современных космической PCA-интерферометрии:

- совершенствование методов и алгоритмов интерферометрической обработки, направленное на повышение точности результатов и снижение вычислительной сложности;
- увеличение пространственного разрешения съёмочных систем и освоение различных частотных диапазонов;
- соединение различных радиолокационных методов: поляризационная (PolInSAR [54, 78, 79]), инверсная (InISAR [80]), многочастотная (multifrequency) и многобазовая (multibase, [81]) интерферометрические технологии и др.;
- широкое распространение методов дифференциальной интерферометрической съёмки, особенно — метода постоянных отражателей [35].

Результаты экспериментов и практика применения интерферометрической съёмки выявили и основные проблемы в получении и обработке радиолокационной информации в системах дистанционного зондирования Земли:

- неоднозначность фазовых измерений и, как следствие, необходимость выполнения развёртывания фазы при интерферометрической обработке [52];
- пространственная и временная декорреляция радиолокационных эхо-сигналов, приводящая к необходимости подавления фазового шума и отбраковке участков интерферо-

грамм РСА [53];

– специфические геометрические искажения радиолокационных изображений (РЛИ) — сдвигка (foreshortening) и наложение (layover), характерные для равнодальностной проекции и требующие применения специальных методов геопривязки [32, 82, 83, 84].

Основными научными центрами и организациями, проводящими исследования в области космической РСА-интерферометрии и имеющими опыт разработки съёмочной аппаратуры, являются: НАСА (лаборатория реактивного движения — JPL), Европейское космическое агентство (ESA), в том числе Германский центр авиации и космонавтики (DLR) и Итальянское космическое агентство (ASI), Канадское космическое агентство (CSA), Японское космическое агентство (JAXA), Концерн радиостроения «Вега» (Россия), АО «НИИ ТП», Китайская аэрокосмическая научно-техническая корпорация (CASC).

Таким образом, можно сделать вывод, что РСА-интерферометрия в настоящее время является областью активных научных исследований и технических разработок, направленных на повышение качества получаемой информации и сокращение вычислительных издержек.

## **1.2 Принципы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой. Этапы обработки**

Вопросы моделирования радиолокационной интерферометрической съёмки рассматривались Родригезом и Мартином [31], Бамлером и Хартлом [32], Ханссеном [34]. Исходными данными при интерферометрической съёмке земной поверхности являются два комплексных радиолокационных изображения (КРЛИ), полученных радиолокатором с синтезированной апертурой с двух параллельных орбит, расположенных на малом расстоянии (для космической съёмки — до нескольких километров) друг от друга (рис. 1.1).

С точки зрения формирования и преобразования эхо-сигналов в РСА при интерферометрической съёмке удобно применять модели формирования РЛИ в формах, использующихся в [21, 85, 86, 87]. В этом случае радиолокационные импульсные зондирующий  $s_0(t)$  и отражённый  $s_C(t)$  сигналы от одиночной точечной цели  $C$  будут выглядеть следующим образом:

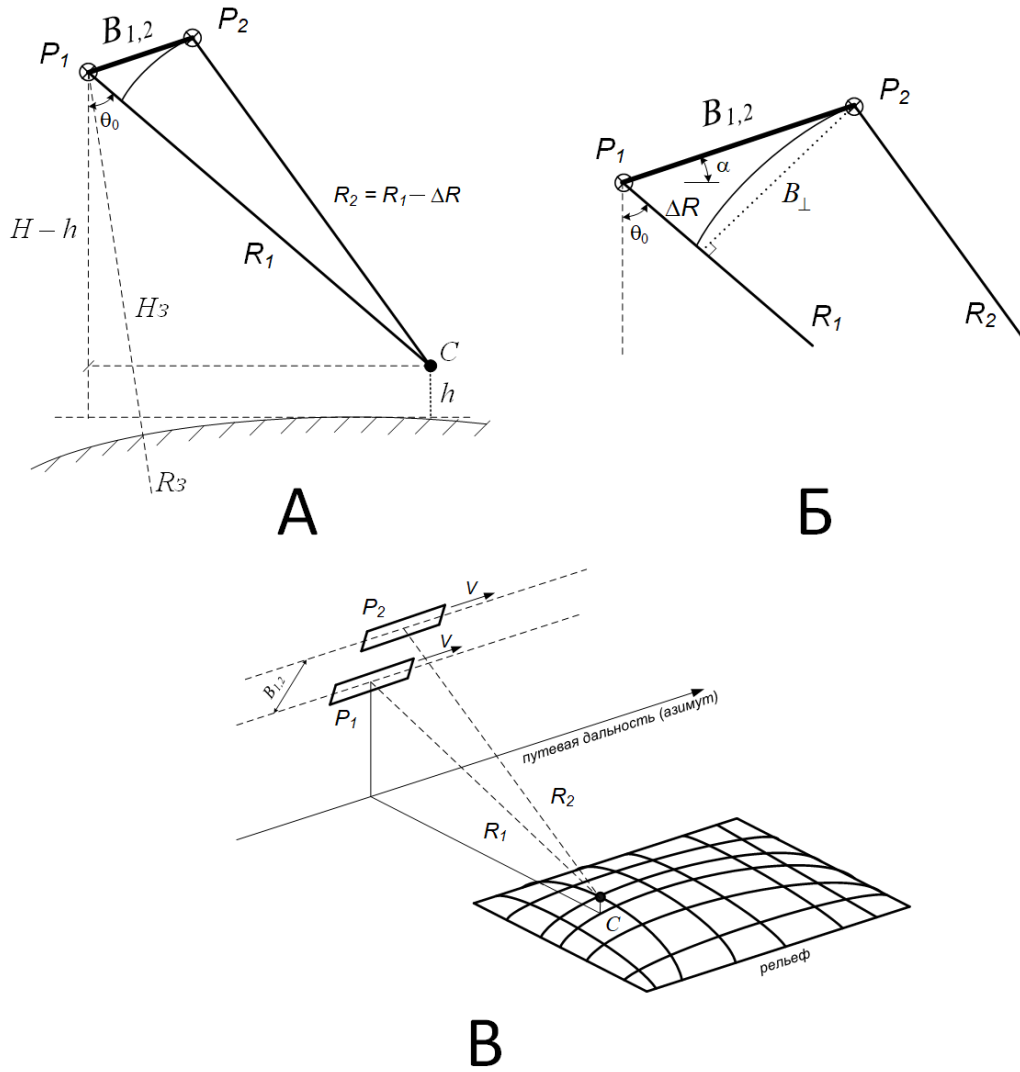


Рис. 1.1: Геометрия радиолокационной интерферометрической съемки:  $P_1$  и  $P_2$  — положения носителя РСА (центры синтезированных апертур) при наблюдениях элемента поверхности  $C$ ,  $R_1$  и  $R_2$  — наклонные дальности,  $B_{1,2}$  и  $B_{\perp}$  — интерферометрическая база и её нормальная составляющая,  $\theta_0$  — угол падения антенного луча,  $H_3$  и  $H$  — высота орбиты носителя над поверхностью Земли и высота, приведённая к геометрии «плоской Земли» при первом наблюдении

$$\begin{aligned}
 \dot{s}_0(t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \dot{U}(t - mT_s) e^{j\omega_0 t}, \\
 \dot{s}_C(t) &= K_z \sum_{m=-\frac{N_s-1}{2}}^{\frac{N_s-1}{2}} G_{(1)}(t - mT_s - t_{zm}) \dot{U}(t - mT_s - t_{zm}) e^{j\omega_0(t - mT_s - t_{zm}) + j\varphi_z},
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $t_{zm}$  — время задержки для  $m$ -го импульса,  $G_{(1)}(t)$  — закон модуляции (в одномерной форме записи) амплитуды импульсов диаграммой направленности антенны РСА,  $\dot{U}(t)$  —

комплексная огибающая зондирующего сигнала;  $K_z$  — коэффициент, учитывающий изменение амплитуды сигнала при распространении, отражении и усилении сигнала в приёмном тракте,  $T_s$  — период следования зондирующих импульсов,  $\varphi_z$  — начальная фаза радиолокационного сигнала с учётом её изменения при отражении от цели,  $N_s$  — количество импульсов в пределах диаграммы направленности антенны,  $\omega_0$  — частота зондирующего сигнала. При представлении сигнала с выхода фазовых детекторов в виде радиоголограммы отдельно рассматриваются «быстрое время»  $t_R$ , исчисляемое в пределах периода повторения импульсов, и «медленное время»  $t_X = mT_s$ , исчисляемое по номеру зондирующего импульса. В этом случае сигнал рассматривается как функция двух переменных:

$$\dot{s}(t_X, t_R) = K_z G_2(t_X, t_R) \dot{U}(t_R - t_X) e^{-\frac{j\omega_0 t_X}{c} + j\varphi_z}, \quad (1.2)$$

где  $G_{(2)}(x, R(x))$  — диаграмма направленности антенны РСА в угломестной системе координат. Принимая  $x \approx V_s t_X$ ,  $r = ct_R/2$ , где  $c$  — скорость распространения электромагнитной волны,  $x$  — путевая дальность,  $r$  — текущая наклонная дальность,  $V_s$  — путевая скорость движения носителя РСА, можно перейти к следующей форме записи радиоголограммы:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x, r) &= K_z G_{(2)}(x - x_0, r - R(x)) \dot{U}(r - R(x)) e^{-\frac{j2\omega_0}{c} R(x) + j\varphi_z} = \\ &= K_z G_{(2)}(x - x_0, r - R(x)) \dot{U}(r - R(x)) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R(x - x_0) + j\varphi_z}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\lambda$  — длина волны зондирующего сигнала,  $\lambda = 2\pi c/\omega_0$ ,  $x_0$  — азимутальное положение цели,  $R(x)$  — зависимость наклонной дальности от текущего положения РСА в пределах синтезированной апертуры. При синтезе апертуры производится свёртка сигнала  $\dot{s}(x, r)$  и опорной функции  $\dot{h}(x, r)$ , которая задаётся следующим образом:

$$\dot{h}(x, r) = \dot{s}^*(-x, -r) \Big|_{x_0=0} = H_{(2)}(-x, -R(-x)) \dot{U}^*(-r) e^{\frac{4\pi j}{\lambda} R(x)}, \quad (1.4)$$

где  $H_{(2)}(x, r)$  — амплитуда (весовая функция) опорной функции (обычно,  $H_{(2)}(x, r) = G_{(2)}(x, r)$ ).

Как правило, свёртка с опорной функцией производится в 2 этапа: сначала осуществляется свёртка (сжатие) по дальности с получением промежуточной радиоголограммы

$\dot{P}(x, r)$ :

$$\begin{aligned}\dot{P}(x, r) &= \int_0^{\tau_{imp}} \dot{s}(x, \rho) h(x, r - \rho) d\rho = K_z G_{(2)}(x - x_0, R(x)) H_{(2)}(x, R(x)) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R(x - x_0)} \times \\ &\times e^{\frac{4\pi j}{\lambda} \hat{R}(x)} \times \int_0^{\tau_{imp}} \dot{U}(\rho - R(x)) \dot{U}^*(-r + \rho) d\rho = \times \\ &= G_{(2)}(x - x_0, R(x)) H_{(2)}(x, R(x)) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R(x - x_0)} e^{\frac{4\pi j}{\lambda} \hat{R}(x)} \dot{U}_R(r - R(x)),\end{aligned}\quad (1.5)$$

где  $\dot{U}_R(r)$  — комплексная огибающая сжатого по дальности сигнала (импульса); затем производится свёртка (сжатие) сигнала  $\dot{P}(x, r)$  по путевой дальности (азимуту), перед которой предварительно исправляются эффекты миграции и искривления дальности при компенсации этих эффектов (преобразованиями CSA, Столта, ЛЧМ-масштабированием и др. [21, 25, 88]). В результате формируется КРЛИ цели  $\dot{Z}(x, r)$ :

$$\begin{aligned}\dot{Z}(x, r) &= \int_{-L_s/2}^{L_s/2} \dot{P}(\xi, r) h(x - \xi, r) d\xi = K_z \dot{U}_R(r - R(x)) \times \\ &\times \int_{-L_s/2}^{L_s/2} G_{(2)}(\xi - x_0, R(x)) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R(\xi - x_0)} H_{(2)}(x - \xi, R(x)) e^{\frac{4\pi j}{\lambda} \hat{R}(x - \xi)} d\xi,\end{aligned}\quad (1.6)$$

где  $L_s$  — длина синтезированной апертуры,  $L_s \approx N_s V_s T_s$ . Зависимость наклонной дальности до цели от азимутального положения носителя с учётом миграции дальности может быть принята следующей [88]:

$$R(x) \approx R_0 - \frac{\lambda}{2} \left[ f_d \frac{x}{V_s} + \frac{1}{2} f'_d \left( \frac{x}{V_s} \right)^2 \right], \quad (1.7)$$

где  $R_0$  — наклонная дальность до цели на траверзе,  $f_d = -\frac{2}{\lambda} V_{sR}$ ,  $f'_d = -\frac{2}{\lambda} \left[ A_R + \frac{V_{sR}^2}{R_0} \right]$  — центральная доплеровская частота эхо-сигнала и её производная,  $V_{sR}$ ,  $V_{sT}$  — радиальная и тангенциальная составляющие скорости носителя РСА,  $A_R$  — радиальная составляющая ускорения носителя РСА. При расчёте опорной функции оценка наклонной дальности  $\hat{R}(x)$  принимается следующей:

$$\hat{R}(x) = -\frac{\lambda}{2} \left[ \hat{f}_d \frac{x}{V_s} + \frac{1}{2} \hat{f}'_d \left( \frac{x}{V_s} \right)^2 \right] = \frac{x \hat{V}_{sR}}{V_s} + \frac{1}{2} \left( \hat{A}_R + \frac{\hat{V}_{sR}^2}{\hat{R}_0} \right) \left( \frac{x}{V_s} \right)^2, \quad (1.8)$$

т.е. из (1.7) опускается постоянная составляющая  $R_0$ , что делает возможной дальнейшую интерферометрическую обработку КРЛИ [21]. После подстановки (1.7)-(1.8) в (1.6) и при



условии точной фокусировки синтезированной апертуры ( $f_d = \hat{f}_d$ ,  $f'_d = \hat{f}'_d$ ) можно получить следующий вид отклика РСА на точечную цель (сигнальную функцию):

$$\begin{aligned} \dot{Z}(x, r) = & K_z \dot{U}_R(r - R_0) \int_{-X_s/2}^{X_s/2} G_{(2)}(\xi - x_0, R_0) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} \left( R_0 + f_d \frac{\xi - x_0}{V_s} + \frac{1}{2} f'_d \left( \frac{\xi - x_0}{V_s} \right)^2 \right)} \times \\ & \times H_{(2)}(x - \xi, R_0) e^{\frac{4\pi j}{\lambda} \left( f_d \frac{x - \xi}{V_s} + \frac{1}{2} f'_d \left( \frac{x - \xi}{V_s} \right)^2 \right)} d\xi = \dot{U}_R(r - R_0) e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R_0} e^{-\frac{4\pi j f_d}{\lambda V_s} (x - x_0)} e^{-\frac{4\pi j f'_d}{\lambda V_s^2} (x^2 - x_0^2)} \times \\ & \times \int_{-X_s/2}^{X_s/2} G_{(2)}(\xi - x_0, R_0) H_{(2)}(x - \xi, R_0) e^{\frac{4\pi j}{\lambda} \frac{2f'_d(x - x_0)\xi}{V_s^2}} d\xi. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В условиях бокового обзора, почти прямолинейного движения носителя РСА и при использовании зондирующего сигнала в виде импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) можно принять, что  $G_{(2)}(x, R_0) \approx 1$  и  $H_{(2)}(x, R_0) \approx 1$  на интервале синтезирования, и получить в явном виде отклик РСА от точечной цели:

$$\dot{Z}(x, r) \approx K_z L_s e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R_0} e^{-\frac{4\pi j f_d}{\lambda V_s} (x - x_0)} e^{-\frac{4\pi j f'_d}{\lambda V_s^2} (x^2 - x_0^2)} e^{j \frac{\mu_c}{c^2} (r - R_0)^2} \times \frac{\sin \frac{\mu_c (r - R_0)}{c^2}}{\frac{\mu_c (r - R_0)}{c^2}} \times \frac{\sin \frac{2\pi f'_d L_s (x - x_0)}{\lambda V_s^2}}{\frac{2\pi f'_d L_s (x - x_0)}{\lambda V_s^2}}, \quad (1.10)$$

где  $\mu_c$  — коэффициент ЛЧМ зондирующего импульса. При цифровой обработке сигналов в приёмнике РСА осуществляется двукратная дискретизация сигнала по путевой дальности — за счёт импульсного характера зондирующего сигнала, и по наклонной дальности — за счёт аналого-цифрового преобразования сигнала а выходах фазовых детекторов приёмника. В результате сигнальная функция принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{m,n} = & K_z L_s e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R_0} e^{-\frac{4\pi j f_d}{\lambda} (T_s(m - m_0))} e^{-\frac{4\pi j f'_d}{\lambda V_s^2} (m^2 - m_0^2)} e^{j \frac{\mu_c}{c^2} (\delta_R(n - n_0))^2} \times \\ & \times \frac{\sin \frac{\mu_c \delta_R (n - n_0)}{c^2}}{\frac{\mu_c \delta_R (n - n_0)}{c^2}} \times \frac{\sin \frac{2\pi f'_d N_s T_s (m - m_0)}{\lambda V_s}}{\sin \frac{2\pi f'_d T_s (m - m_0)}{\lambda V_s}}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $m \approx \frac{x}{V_s T_s}$ ,  $n = \frac{r}{\delta_R}$ ,  $m_0$  и  $n_0$  — номера отсчётов, соответствующих положению цели или участка поверхности на РЛИ;  $\delta_R$  — период дискретизации сигнала по наклонной дальности. Во многих случаях в выражении (1.8) можно принять, что  $V_{ст} \approx V_s$  и  $A_R \approx 0$ , и тогда (1.11) можно записать в следующем виде [21, 87]:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{m,n} &\approx K_z L_s e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} R_0} e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} \frac{(V T_s(m-m_0))^2}{2R_0}} e^{-\frac{4\pi j f_d}{\lambda} (T_s(m-m_0))} e^{-\frac{4\pi j f'_d}{\lambda V_s^2} (m^2-m_0^2)} e^{\frac{\mu_c}{c^2} (\delta_R(n-n_0))^2} \times \\ &\times \frac{\sin \frac{\mu_c \delta_R(n-n_0)}{c^2}}{\frac{\mu_c \delta_R(n-n_0)}{c^2}} \times \frac{\sin \frac{2\pi L_s V_s T_s(m-m_0)}{\lambda R_0}}{\sin \frac{2\pi V_s T_s(m-m_0)}{\lambda R_0}}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

На первом этапе интерферометрической обработки происходит поэлементное пространственное совмещение, по меньшей мере, двух КРЛИ  $\dot{Z}_{1,m,n}$  и  $\dot{Z}_{2,m,n}$  с формированием интерферограммы — интерферометрической (разностной) фазы двух КРЛИ, которая для точечного отражателя  $(m_0, n_0)$  будет определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{m,n} &= \arg \left\{ \dot{Z}_{1,m,n} \cdot \dot{Z}_{2,m,n}^* \right\} = \\ &= \arg \left\{ e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} (R_{01,m_0,n_0} - R_{02,m_0,n_0})} e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} \left( \frac{(f_{d1} T_s(m-m_0))}{V_{s1}} - \frac{(f_{d2} T_s(m-m_0))}{V_{s2}} \right)} e^{-\frac{4\pi j}{\lambda} \left( \frac{(f'_{d1} T_s(m^2-m_0^2))}{V_{s1}^2} - \frac{(f'_{d2} T_s(m^2-m_0^2))}{V_{s2}^2} \right)} \right\}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

где  $R_{01,m_0,n_0}$ ,  $R_{02,m_0,n_0}$  — минимальные (на траверзе) наклонные дальности до отражателя на КРЛИ. Поскольку при интерферометрической съёмке используются почти параллельные близко расположенные орбиты, то можно принять, что  $f_{d1} \approx f_{d2}$ ,  $f'_{d1} \approx f'_{d2}$ ,  $V_{s1} \approx V_{s2}$ , и тогда для элемента КРЛИ  $(m, n)$  интерферометрическую фазу можно принять следующей:

$$\Delta\varphi_{m,n} \approx \arg \left\{ e^{-\frac{4\pi}{\lambda} (R_{01,m,n} - R_{02,m,n})} \right\}. \quad (1.14)$$

Интерферометрическая фаза содержит составляющие, обусловленные рельефом местности — топографическая фаза  $\Psi_{m,n}$ , изменением наклонной дальности за счёт смещения элемента поверхности между съёмками (при двухпроходной съёмке) —  $\Delta D_{m,n}$ , изменением условий распространения радиоволн в атмосфере за период между съёмками —  $\Delta\varphi_{atm,m,n}$  [21, 34, 89, 90], а также фазовый шум  $\Delta\varphi_{noise,m,n}$ , который, в свою очередь, обусловлен частичной потерей когерентности отражённых волн из-за различий ракурсов съёмки и изменчивостью поверхности за время между съёмками при двухпроходной съёмке (пространственная и временная декорреляции) [34, 30]:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{m,n} &\approx W \left\{ -\Psi_{m,n} - \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_{m,n} + \Delta\varphi_{atm,m,n} + \Delta\varphi_{noise,m,n} \right\} \\ \Psi_{m,n} &= \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{m,n} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_{01,m,n} - R_{02,m,n}), \end{aligned} \quad (1.15)$$

где  $W\{\cdot\}$  — символическая запись свёртывания фазы в диапазон значений  $[-\pi.. \pi)$ . Связь между высотой элементарного участка поверхности  $H_{m,n}$  относительно опорной поверхности (референц-эллипсоида или плоскости Земли) и формируемой им абсолютной фазой  $\Psi_{m,n}$  в разных вариантах приводится в работах [91, 12], например:

$$\begin{aligned} H_{m,n} &= H_{ref} - R_{1m,n} \times \left( \cos \alpha \cdot \sqrt{1 - \Theta^2} - \sin \alpha \cdot \Theta \right), \\ \Theta &= \frac{B_{1,2}^2 - \Delta R_{m,n}^2 + 2R_{1m,n}\Delta R_{m,n}}{2B_{1,2}R_{1m,n}}, \\ \Delta R_{m,n} &= \frac{\lambda \Psi_{m,n}}{4\pi}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где  $H_{ref}$  — высота траектории носителя РСА относительно поверхности отсчёта высот,  $\alpha$  — угол уклона интерферометрической базы относительно «плоской Земли». В геометрии земного эллипсоида соотношение будет выглядеть схожим, но более сложным образом [91], при этом можно привести его к виду (1.16) путём замены высот  $H_{ref}$  и  $H_{m,n}$  и углов  $\alpha$  и  $\theta_0$  на значения, исчисляемые относительно плоскости, касательной к земному эллипсоиду в точке расположения цели (рис. 1.1) [31].

Таким образом, целью интерферометрической обработки является восстановление (получение оценки) абсолютной фазы  $\hat{\Psi}_{m,n}$  путём выполнения операции развёртывания фазы и подавление шумовой компоненты  $\Delta\varphi_{noise,m,n}$ .

Интерферометрическая обработка радиолокационных данных является многоэтапным процессом (рис. 1.2), первым этапом которого является **совмещение (взаимопривязка)** двух КРЛИ и вычисление интерферограммы  $\Delta\varphi_{m,n}$  по формуле (1.13). Как правило, взаимодействие осуществляется путём вычисления максимума взаимной корреляционной функции (ВКФ) амплитудных РЛИ (АРЛИ). Считается [34, 91], что точность привязки должна быть субпиксельной, т.е. допустимое расхождение КРЛИ должно быть меньше размеров пикселя, для чего расчёт ВКФ производится в локальных окнах АРЛИ, в пределах которых осуществляется повышение частоты дискретизации изображений. Другой метод привязки — с использованием фазовой информации и величины взаимной когерентности изображений описан в [92]. В дифференциальной интерферометрии при применении метода постоянных отражателей для вычисления сдвигов АРЛИ используются координаты самих постоянных отражателей [35].

Интерферограмма представляет собой двумерный процесс (изображение), характерным признаком которого являются интерференционные полосы — фринги (рис. 1.3), гра-

ницы которых соответствуют набегам разностей фаз на величину  $2\pi$  (что соответствует изменению разностного расстояния на величину  $4\pi\Delta R/\lambda$ ) и зависят от геометрических характеристик системы и рельефа местности. Интерферограмма  $\Delta\varphi_{m,n}$  поэлементно привязана к первому КРЛИ (КРЛИ-1)  $Z_{1,m,n}$  (рис. 1.4).

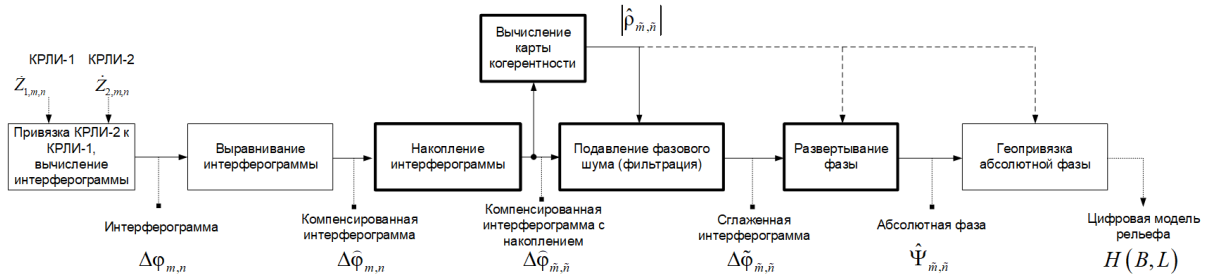


Рис. 1.2: Этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных

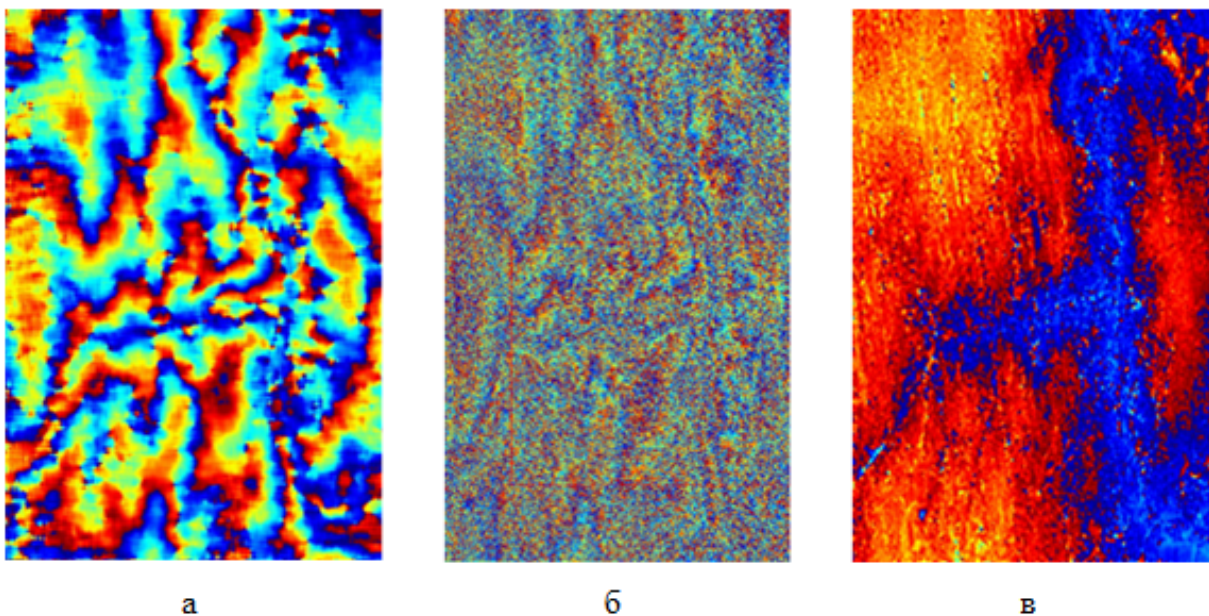


Рис. 1.3: Интерферограммы PCA ALOS PALSAR участка земной поверхности при различных режимах съёмки: а) ГГ-поляризация,  $B_{\perp} = 3500$  м; б) ГВ-поляризация,  $B_{\perp} = 3500$  м; в) ГГ-поляризация,  $B_{\perp} = 500$  м

Последующие этапы интерферометрической обработки включают компенсацию фазового уклона, межэлементное некогерентное накопление, подавление фазового шума (сглаживании интерферограммы), развёртывание интерферометрической фазы и геопривязку абсолютной фазы (преобразование фазы в ЦМР).

**Компенсация фазового уклона** (выравнивание интерферограммы — «interferogram flattening») заключается в устранении априорно известной информации о поведении фазы, в первую очередь — линейного поперечного набега фазы, связанного с геометрией

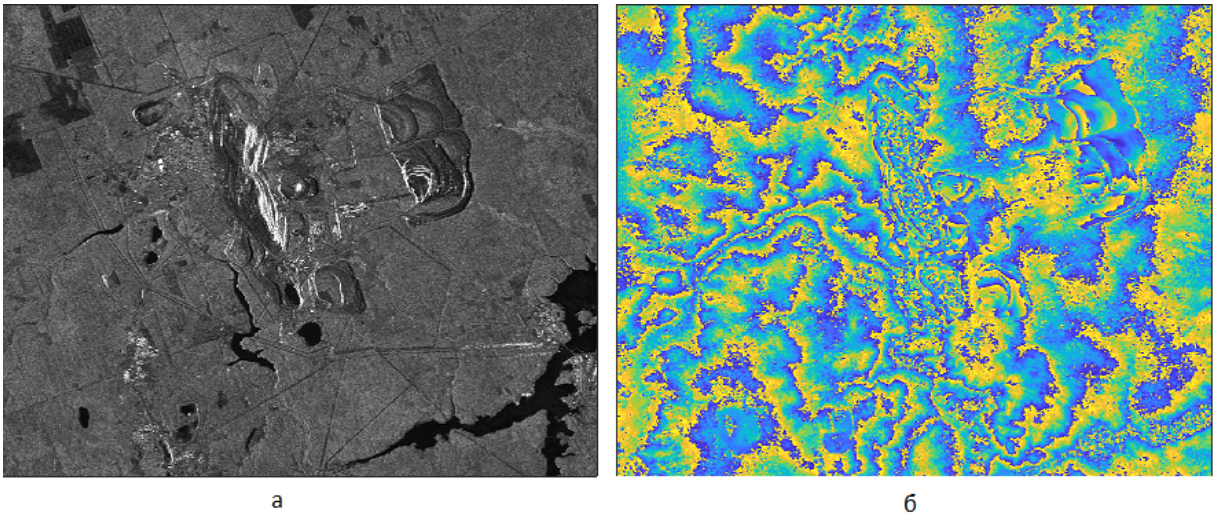


Рис. 1.4: Амплитудное радиолокационное изображение местности (а) и соответствующая интерферограмма (б)

бокового обзора, что позволяет сократить число интерференционных полос и упростить реализацию последующих этапов обработки. Для компенсации используется дополнительное фазовое поле  $\Phi_{m,n}^C$ , рассчитанное исходя из параметров траектории носителя и геометрии опорной поверхности (общеземного либо референц-эллипсоида, а также привязанным к ним низкодетальным ЦМР), или адаптивная компенсация уклона на основе характеристик самой интерферограммы. Компенсация осуществляется следующим образом:

$$\Delta\varphi_{m,n}^C = \arg \left\{ \exp \left[ j \left( \Delta\varphi_{m,n} - \Phi_{m,n}^C \right) \right] \right\}. \quad (1.17)$$

При компенсации уклона происходит перенос спектра интерферограммы в область нижних частот, что позволяет трактовать её как демодуляцию пространственной частоты интерферограммы. Одновременно с этим изменяется и характер интерференционных полос: если до компенсации они следуют в направлении, взятом вдоль линии визирования РСА, то после неё полосы следуют в направлении нормали к поверхности, использованной для построения поля  $\Phi_{m,n}^C$  (рис. 1.5). Следует отметить, что ввиду характера преобразования спектра при выравнивании интерферограммы, представляется ошибочным выполнение некогерентного накопления перед выравниванием, как это реализовано в программных пакетах SARscape и PHOTOMOD RADAR: несмотря на небольшую экономию вычислительных ресурсов, повреждения сигнала, связанные с искажением спектра, еще не смещенного в область низких частот, при понижении частоты дискретизации усложняют процесс развёртывания фазы и отрицательным образом сказываются на точности

получаемого результата.

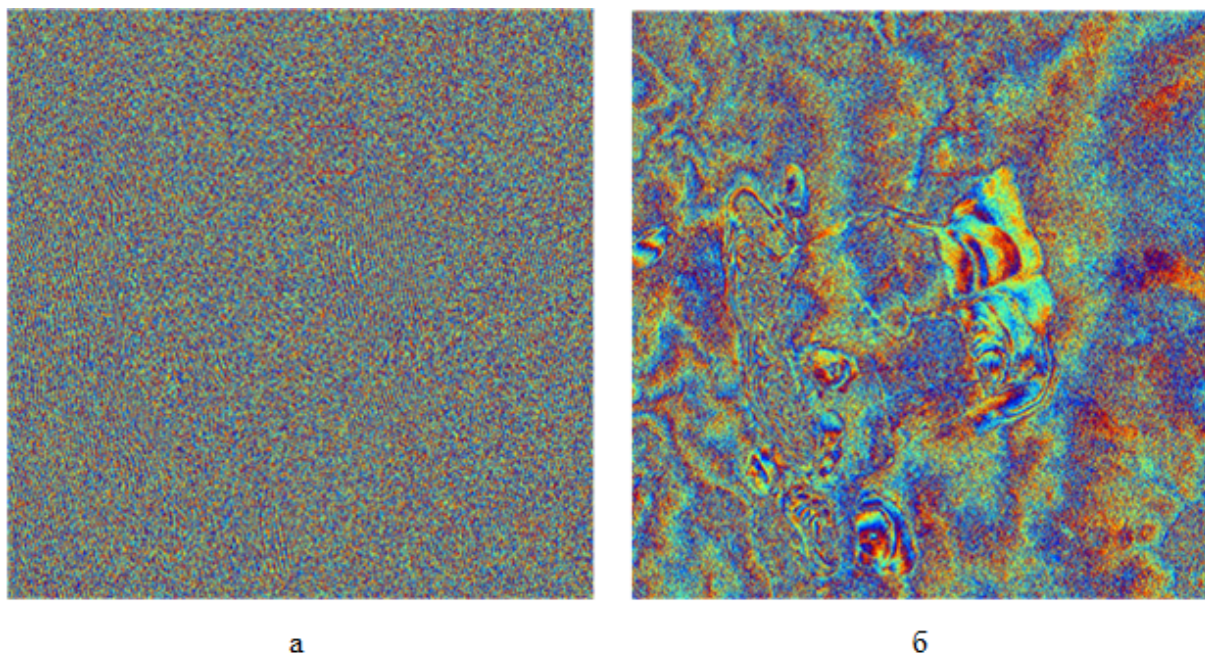


Рис. 1.5: Выравнивание интерферограммы: а) исходная интерферограмма; б) интерферограмма после выравнивания

**Межэлементное некогерентное накопление** (multilooking, накопление) интерферограммы заключается в суммировании его соседних отсчетов с равными (либо неравными, но действительными) весами, размер интерферограммы при этом уменьшается:

$$\Delta\varphi_{m,n}^C \rightarrow \Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^C \Big|_{\tilde{m}=m/c_A, \tilde{n}=n/c_R}, \quad (1.18)$$

где  $c_A, c_R$  — коэффициенты накопления по путевой и наклонной дальностям, соответственно. Накопление позволяет снизить уровень флуктуаций интерферометрической фазы при одновременном ухудшении разрешающей способности данных. Кроме того, оно позволяет согласовать пространственные разрешения интерферограммы по азимуту и наклонной дальности, а также ускорить выполнение последующих этапов интерферометрической обработки.

**Подавление фазового шума** является критически важным этапом интерферометрической обработки, поскольку вне зависимости от условий съемки исходный уровень фазового шума делает невозможным дальнейшее восстановление абсолютной фазы. Его результатом является сглаженная интерферограмма  $\Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^F$  (рис. 1.6). Подавление фазового шума интерферограммы осуществляется, как правило, двумерными линейными либо

адаптивными фильтрами:

$$\Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^F = \Phi \left\{ \Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^C \right\}, \quad (1.19)$$

где  $\Phi\{\cdot\}$  — оператор, реализуемый фильтром (линейный или нелинейный). Наибольшее распространение среди методов фильтрации получил адаптивный фильтр Голдштейна [93, 94], вычисляющий двумерный спектр  $\dot{F}(k, l)$  блока интерферограммы, который затем взвешивается следующим образом:

$$\dot{G}(k, l) = |\dot{F}(k, l)|^{1-|\hat{\rho}|} \cdot \dot{F}(k, l), \quad (1.20)$$

где  $G(k, l)$  — двумерный спектр обрабатываемого блока интерферограммы, из которого обратным двумерным дискретным преобразованием Фурье формируется блок сглаженной интерферограммы,  $|\hat{\rho}|$  — оценка когерентности интерферограммы внутри блока. Фильтр работает в перекрывающихся блоках, после обработки (1.20) смежные блоки сшиваются с помощью взвешивающей функции треугольного вида.

Среди линейных фильтров целесообразным является применение двумерного гауссового фильтра, реализованного в частотной области, с амплитудно-частотной характеристикой вида:

$$\gamma_{k,l} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{k - M_I/2}{F_S} \right)^2 + \left( \frac{l - N_I/2}{F_S} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1.21)$$

где  $M_I, N_I$  — размеры интерферограммы;  $k, l$  — пространственные частоты,  $k = [-M_I/2..M_I/2 - 1]$ ,  $l = [-N_I/2..N_I/2 - 1]$ ;  $F_S$  — частота среза АЧХ фильтра, измеряемая в количестве элементов интерферограммы (далее будут использоваться фильтры с одинаковыми частотами среза вдоль обеих координат).

При подавлении фазового шума формируется новая — сглаженная интерферограмма  $\Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^F$ , которая далее преобразуется в абсолютную фазу путём **развёртывания фазы**:

$$\hat{\Psi}_{\tilde{m},\tilde{n}} = \Delta\varphi_{\tilde{m},\tilde{n}}^F + 2\pi \cdot k_{\tilde{m},\tilde{n}}, \quad (1.22)$$

где  $k_{\tilde{m},\tilde{n}} \in \mathbb{Z}$  — априорно неизвестные целочисленные значения, формирующие добавочное поле, которое в сумме с интерферограммой составит абсолютную фазу  $\hat{\Psi}_{m,n}$ .

Развёртывание сглаженной интерферограммы является критически важным этапом интерферометрической обработки в задаче получения цифровых моделей поверхности, поскольку используемые при выполнении этой задачи геометрические параметры (дли-

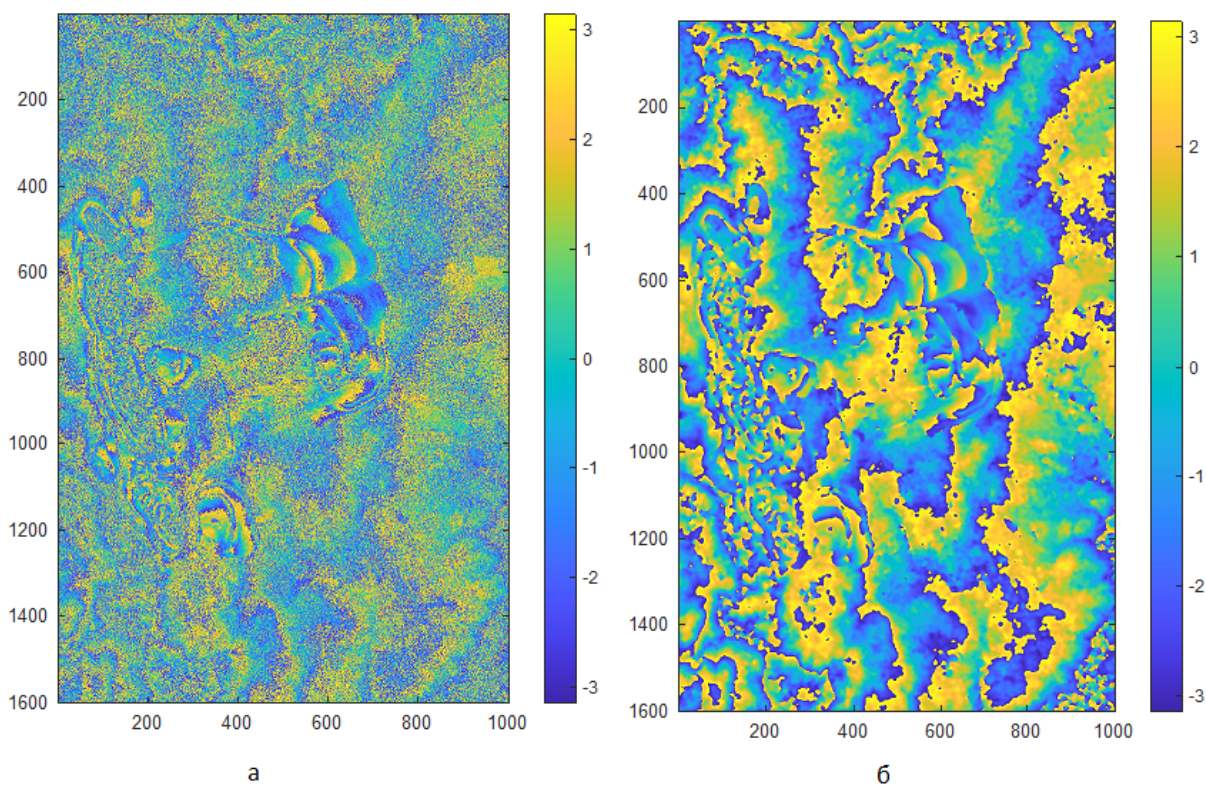


Рис. 1.6: Фильтрация интерферограммы: а) исходная интерферограмма; б) интерферограмма после фильтрации

на нормальной составляющей базы, длина волны РСА) крайне редко позволяют получить однозначную фазу. Реализация развёртывания фазы осложняется наличием на интерферограмме остаточных фазовых шумов и неоднозначностей (разрывов), что делает решение неоднозначным, сложным теоретически и ёмким вычислительно. Алгоритмы реализации (1.22) рассматриваются в разделе 1.4 и главе 2 настоящей работы.

При интерферометрической обработке развёртыванию фазы подвергается интерферограмма  $\Delta\varphi_{m,n}^F$ , прошедшая этапы компенсации фазового уклона, накопления и подавления фазового шума, однако далее для обеспечения компактности обозначений индексы, указывающие на «предысторию» обработки интерферограммы, при рассмотрении вопросов развёртывания фазы специально обозначаться не будут, а будет использовано универсальное обозначение  $\Delta\varphi_{m,n}$ .

Абсолютная фаза связана с формой рельефа поверхности с точностью до постоянного сдвига, коэффициента вертикального масштаба — высоты неоднозначности  $H_A$ , и детерминированного преобразования, исправляющего искажения геометрии бокового обзора РСА. **Геопривязка абсолютной фазы** заключается в выполнении преобразования абсолютных фаз и их координат из полётной системы координат в элементы матрицы высот в



географической системе координат [95]:

$$\{\tilde{m}_i, \tilde{n}_i, \hat{\Psi}_{\tilde{m}_i, \tilde{n}_i}\} \rightarrow \{B_i, L_i, H_i\}, \quad (1.23)$$

где  $B_i, L_i, H_i$  — широты, долготы и высоты точек. Для выполнения этого этапа существуют методы прямого пересчёта, не требующие априорной информации о местности: метод разделения спектра [30, 36] и метод остаточной задержки [37], однако на практике используются более точные методы геокодирования по наземным опорным точкам [30, 96]. Реализация преобразования (1.23) предполагает использование наземных опорных точек (радиолокационных ориентиров)  $\{\vec{A}_i\}$ , имеющих высокоточные координаты и хорошо опознаваемых на амплитудном радиолокационном изображении. В качестве таких точек хорошо подходят пересечения дорог, мосты [95] и др. Координаты опорных точек используются для решения систем уравнений «Дальность — Доплер» для первого и второго КРЛИ:

$$\begin{cases} f_{d1,2} = \frac{2(\vec{A} - \vec{P}_{1,2})(\vec{v}_A - \vec{v}_{P1,2})}{\lambda |\vec{A} - \vec{P}_{1,2}|} \\ R_{1,2}^2 = (\vec{A} - \vec{P}_{1,2})^2 \\ \frac{A_x^2 + A_y^2}{(a_{\oplus} + H_A^G)^2} + \frac{A_z^2}{(b_{\oplus} + H_A^G)^2} = 1, \end{cases} \quad (1.24)$$

где  $f_{d1,2}$  — центральные доплеровские частоты элемента 1-го и 2-го КРЛИ,  $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)^T$  — вектор геоцентрических координат опорной точки,  $\vec{P}_{1,2} = (P_x, P_y, P_z)_{1,2}^T$  — вектор геоцентрических координат фазового центра антенны при съёмке 1-го и 2-го КРЛИ,  $a_{\oplus}, b_{\oplus}$  — большая и малая полуоси земного эллипсоида,  $H_A^G$  — геодезическая высота элемента рельефа над земным эллипсоидом [96]. Разрешая систему относительно  $\vec{P}_{1,2}$ , становится возможным высокоточное вычисление компонентов интерферометрической базы  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$  (учитывая, что  $\vec{B}_i = \vec{P}_{1i} - \vec{P}_{2i}$ ) и пересчёт абсолютных фаз в высоты. Искажения бокового обзора при формировании матрицы высот при этом исправляются путем переноса положения элемента в направлении дальности на величину  $H_{m,n} \times \text{tg } \theta_{0,m,n}$  [97]. Различные способы геопривязки абсолютной фазы рассматриваются и сравниваются в работах [58, 96, 98].

Таким образом, интерферометрическая обработка радиолокационных данных является сложным многоэтапным процессом, целью которого является корректное восстановление абсолютной фазы, заключающееся в минимизации ошибок, вызванных фазовым

шумом, и развёртывании фазы. Абсолютная фаза, в свою очередь, позволяет сформировать карту высот рельефа зондируемой поверхности. Однако неточности измерения положения аппарата-носителя РСА, декорреляция отражённых сигналов, атмосферные задержки радиоволн и другие факторы приводят к ошибкам абсолютной фазы, получаемой при интерферометрической обработке, и ошибкам получаемой цифровой модели рельефа. Исследование влияний технологий съёмки и методов обработки на величины ошибок восстановления абсолютной фазы и измерения высот рельефа земной поверхности является актуальным научно-техническим направлением в области радиолокации.

### 1.3 Источники ошибок абсолютной фазы

Различные авторы и разработчики радиолокационных систем предлагают разные подходы к учету и классификации источников ошибок. Так, в работе [99] в рамках иерархической модели систематизированы различные составляющие ошибки, связанные с неточностью измерения орбитальных параметров, и их влияние на величину вертикальной точности. Модель была построена в процессе формулирования требований к бортовой инерциальной навигационной системе AODA РСА-интерферометра SRTM. В работе [31] предлагается концепция «бюджета ошибки» (error budget), в которой отражены различные составляющие ошибки измерения высоты. Выделяются внутренние (присущие системе) ошибки измерения высоты (intrinsic height errors), связанные с неточностью измерения параметров интерферометрической системы, и позиционные ошибки, связанные с неточностью геопривязки. Там же предлагается и альтернативная классификация, отталкивающаяся от способов борьбы с источниками ошибок, где выделяются:

— случайные ошибки — шумы интерферометрической фазы, которые могут быть снижены путём фильтрации или усреднения, но не могут быть исправлены с помощью наземных радиолокационных ориентиров (наземных опорных точек для геопривязки);

— геометрические искажения (дисторсии), к которым отнесены ошибки позиционирования КА по высоте и углу крена, исправляемые двумя опорными точками, ошибки измерения базы и ошибки синхронизации (атмосферные задержки), исправляемые тремя опорными точками;

— ошибки позиционирования, к которым отнесены ошибки позиционирования КА вдоль путевой дальности, такие ошибки исправляются тремя опорными точками.

Влияние ошибок измерения геометрических параметров системы подробно рассматривается в [30, 34, 91, 100], где отмечается высокая чувствительность ошибок абсолютной фазы к погрешности измерения длины  $l_{1,2}$  и угла уклона  $\alpha$  интерферометрической базы. В работе автора [100] показано, что относительная точность измерения этих величин должна составлять  $10^{-6} \dots 10^{-3}$  и является трудно достижимой практически. Вследствие этого, для обеспечения приемлемой точности привязки и калибровки по высоте получаемых при интерферометрической обработке ЦМР, необходимо использование наземных опорных точек.

Другой подход к оцениванию влияния различных источников ошибок используется в [34, 53], где вместо самих ошибок рассматриваются и классифицируются источники декорреляции интерферометрических данных в рамках модели парциальных коэффициентов когерентности, при этом коэффициент когерентности интерферограммы вычисляется путём произведения парциальных коэффициентов. Коэффициент когерентности  $\hat{\rho}_{m,n}$  является числовой характеристикой декорреляции, часто используемой в РСА-интерферометрии для оценки соотношения полезного сигнала и фазового шума и характеризующий качество участка интерферограммы и его пригодность для дальнейшего преобразования в цифровую модель рельефа или карту изменений рельефа. Оценка когерентности производится в локальных окнах пары взаимопривязанных КРЛИ и вычисляется как коэффициент корреляции между соответствующими комплексными отсчетами этих изображений по формуле:

$$\hat{\rho}_{m,n} = \frac{\left| \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{m=-N_0}^{N_0} \dot{Z}_{1,m,n} \dot{Z}_{2,m,n}^* \right|}{\sqrt{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{m=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{1,m,n}|^2 \times \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{m=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{2,m,n}|^2}}, \quad (1.25)$$

где  $M_0$  и  $N_0$  — полуразмеры окна оценивания. Чем больше  $\hat{\rho}_{m,n}$ , тем, как правило, сильнее топографическая составляющая фазы преобладает над случайной. Пространственное распределение когерентности отражённого сигнала характеризуется с помощью карт когерентности интерферометрической пары. Карты когерентности используются не только для оценки отношения сигнал-шум, но и для оптимизации процесса фильтрации фазового шума [94], а также для исключения повреждённых декорреляцией областей интерферограммы из дальнейшей обработки и итогового результата.

Плотность распределения фазового шума напрямую связана с когерентностью двух

КРЛИ и при отсутствии фильтрации и накопления отсчетов описывается выражением [33]:

$$p_{\varphi}(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) = \frac{1 - \rho^2}{2\pi} \frac{1}{1 - \rho^2 \cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)} \times \left( 1 + \frac{\rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) \arccos(-\rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0))}{\sqrt{1 - \rho^2 \cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)}} \right), \quad (1.26)$$

где  $\Delta\varphi_0$  — математическое ожидание фазы, соответствующее, как правило, топографической фазе. Выражение (1.26) соответствует плотности распределения случайной величины  $(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)$  на интервале  $[-\pi, \pi)$ , имеющей гауссово-подобную форму при средних больших  $\rho$  и вырождающейся в равномерную при малых  $\rho$  [32]. Для получения как можно более устойчивого интерференционного сигнала съемки проводятся с минимально возможным интервалом времени и/или в одинаковый сезон года при сходных погодных условиях.

Способами повышения когерентности интерферометрических данных являются межэлементное некогерентное накопление и фильтрация фазового шума. Влияние некогерентного накопления на плотность распределения фазы  $p_{\varphi}$  подробно рассматривается в [32] и описывается (с точки зрения плотности распределения интерферометрической фазы) следующим образом:

$$p_{\varphi}(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) = \frac{(1 - \rho^2)^c}{2\pi} \left\{ \frac{\Gamma(2c - 1)}{\Gamma^2(c) 2^{2(c-1)}} \times \left[ \frac{(2c - 1)\beta}{(1 - \beta^2)^{c+1/2}} \left( \frac{\pi}{2} + \arcsin \beta \right) + \frac{1}{(1 - \beta^2)^c} \right] + \frac{1}{2(c-1)} \sum_{i=0}^{c-2} \frac{\Gamma(c - 1/2) \Gamma(c - 1 - i)}{c - 1/2 - i} \frac{1 + (2i + 1)\beta^2}{(1 - \beta^2)^{i+2}} \right\}, \quad (1.27)$$

где  $\beta = \rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)$ ,  $c$  — количество накапливаемых элементов КРЛИ. В дальнейшем (раздел 3.5) это выражение будет использовано для сравнения эффективности различных оценок когерентности. Среднеквадратичное отклонение ошибки измерения фазы и высоты определяются в зависимости от величины коэффициента когерентности следующим образом [31, 32]:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin \rho + \arcsin^2 \rho - \frac{\text{Li}_2(\rho^2)}{2} \approx \frac{1 - \rho^2}{2\rho^2}, \quad (1.28)$$

$$\sigma_H = \frac{\lambda R_1 \sin \theta_0}{4\pi B_{\perp}} \sigma_{\Delta\varphi},$$

где  $\text{Li}_2(\cdot)$  — дилогарифм Эйлера.

Цебкер [53] выделяет 4 источника декорреляций: временную, пространственную и тепловую и декорреляцию, вызванную изменением угла визирования цели во время синтеза апертуры (rotation-induced decorrelation), а также предлагает модели расчёта этих величин. Более полная классификация приведена у Ханссена [34], где выделено и подробно проанализировано 6 источников декорреляций:

- геометрическая декорреляция, вызванная различием углов визирования в вертикальной плоскости;
- доплеровская декорреляция, вызванная различием углов визирования в плоскости апертуры и цели;
- объёмная декорреляция;
- шумовая декорреляция;
- временная декорреляция;
- декорреляция, возникающая при взаимопривязке двух КРЛИ.

Одной из проблем в оценивании когерентности является зависимость получаемого значения оценки от уклона топографической фазы, обусловленного как естественной топографией, так и геометрией радиолокационного обзора (рис. 1.7).

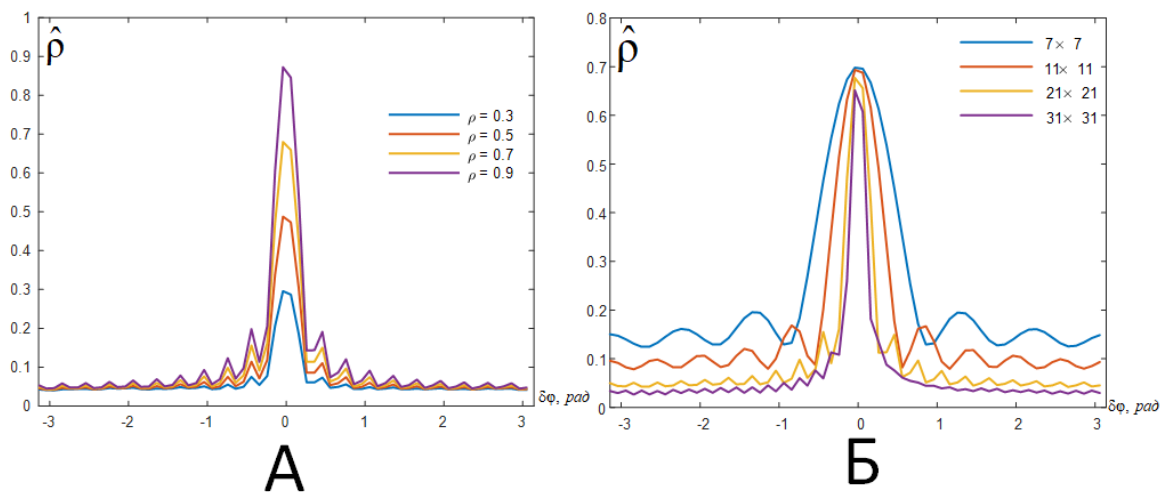


Рис. 1.7: Смещение оценки когерентности (1.25) под действием уклона топографической фазы  $\delta\phi$ : А) для трёх разных коэффициентов когерентности (корреляции); Б) для трёх разных размеров окна оценивания

Проблема смещения оценки когерентности под влиянием уклона интерферометрической фазы и методы уменьшения этого влияния рассматривались в [101, 102], при этом вы-

делялось два основных пути: построение оценок, использующих только информацию об амплитуде или интенсивности или введение в выражение оценки дополнительного множителя, корректирующего изменения топографической фазы в пределах окна оценивания по внешней цифровой модели рельефа (например, SRTM). Также для устранения влияния уклонов были предложены методы оценивания когерентности по интерферограмме уклонов фазы и компенсация уклона, основанная на двумерном быстром преобразовании Фурье (БПФ). Вопросы эффективности оценивания когерентности рассматриваются в разделах 3.5 и 4.4 настоящей работы.

Помимо декорреляций существенной причиной снижения точности результатов интерферометрической обработки являются ошибки разрешения фазовой неоднозначности — артефакты развёртывания фазы [30, 34, 103]. Борьба с такими ошибками подразумевает использование априорной информации о форме рельефа и совершенствование методов развёртывания интерферометрической фазы.

#### 1.4 Аналитический обзор методов развёртывания интерферометрической фазы

Развёртывание фазы по праву можно полагать основным этапом интерферометрической обработки данных радиолокационного зондирования Земли, поскольку его невыполнение в подавляющем большинстве случаев не позволит получить осмысленного и пригодного к практическому использованию результата. При развёртывании фазы осуществляется «склеивание» интерференционных полос относительной фазы  $\Delta\varphi_{m,n}$  в картину абсолютной фазы  $\hat{\Psi}_{m,n}$  (рис. 1.8). Основной подход к решению этой задачи заключается в суммировании фазового градиента вдоль какой-либо траектории, охватывающей все элементы интерферограммы (рис. 1.9) [38]:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_{m,n} &= W \{ \Delta\varphi_{m,n} - \Delta\varphi_{m-m_i, n-n_j} \}, \\ \Psi_{m,n} &= \delta\varphi_{m,n} + \delta\varphi_{m-i, n-j}, \end{aligned} \quad (1.29)$$

где  $m_i = 1, n_j = 0$  при развёртывании по направлению вниз по вертикали (по столбцам), либо  $m_i = 0, n_j = 1$  при развёртывании вправо по горизонтали (по строкам). Однако результат такого развёртывания будет корректным только при отсутствии на интерферограмме разрывов фазы — нарушений непрерывности интерферограммы, при которых возникает зависимость результата развёртывания от направления суммирования разностей  $\delta\varphi_{m,n}$

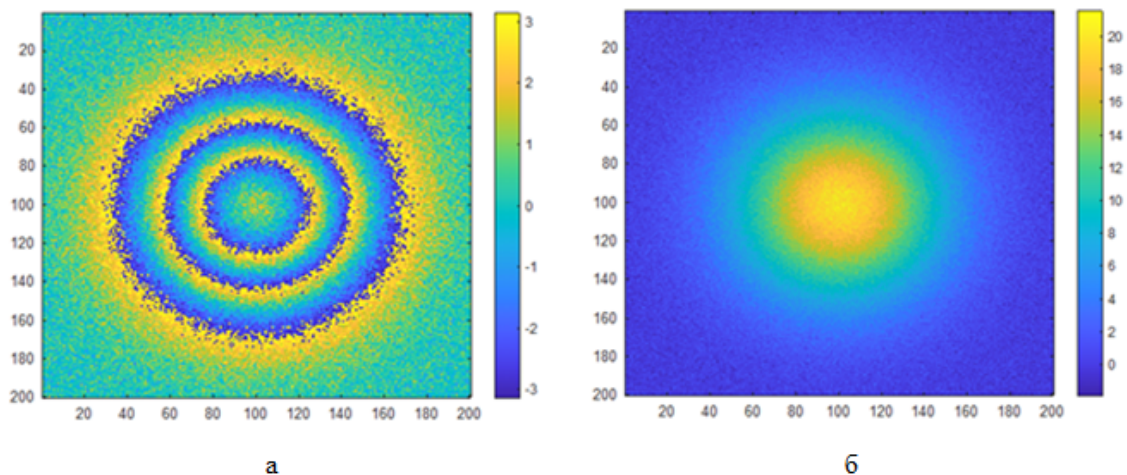


Рис. 1.8: Развертывание фазы: а) интерферограмма относительной фазы , б) интерферограмма абсолютной фазы

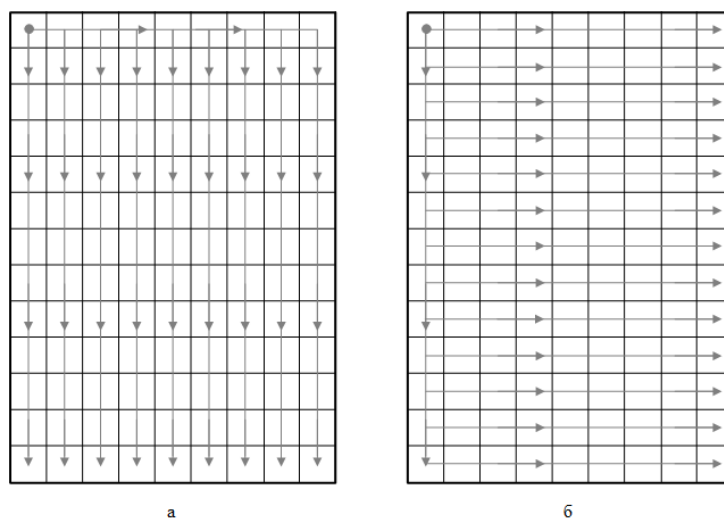


Рис. 1.9: Возможные траектории суммирования градиента при развёртывании фазы

[30, 38]. Разрыв фазы, как правило, представляет собой некоторую линию произвольной траектории, на концах которой — точках разрыва фазы (сингулярных точках) — нарушается условие равенства нулю суммы разностей фаз на элементарном замкнутом контуре:

$$\begin{aligned}
 Q_{m,n} = & W\{\Delta\varphi_{m,n} - \Delta\varphi_{m-1,n}\} + W\{\Delta\varphi_{m-1,n} - \Delta\varphi_{m-1,n-1}\} + \\
 & + W\{\Delta\varphi_{m-1,n-1} - \Delta\varphi_{m,n-1}\} + W\{\Delta\varphi_{m-1,n} - \Delta\varphi_{m,n}\},
 \end{aligned}
 \tag{1.30}$$

где  $Q_{m,n}$  — функция, отличная от нуля в точках разрыва интерферограммы и вычисляемая по правилам, схожим с правилами вычисления вычетов функций комплексной переменной (далее  $Q_{m,n}$  будет именоваться функцией вычетов). Функция вычетов равна нулю, если на интерферограмме в позиции  $(m,n)$  отсутствует точка разрыва, и  $\pm 2\pi q$  ( $q \in \mathbb{N}$  —

порядок разрыва) при наличии точки 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, а при пересечении соединяющей их линии при развёртывании по правилу (1.29) возникает ошибка, заключающаяся в появлении или пропуске одной интерференционной полосы относительно путей суммирования, не пересекающих эту линию (рис. 1.10), и абсолютная фаза в такой ситуации в принципе не может быть восстановлена однозначно [30, 34, 104, 91, 32].

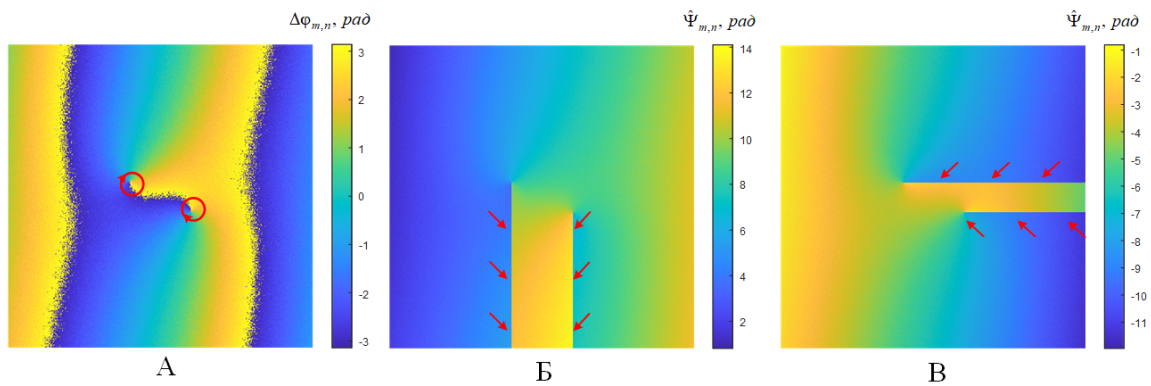


Рис. 1.10: Ошибка (артефакт) развёртывания фазы при прохождении линии разрыва: А) исходная интерферограмма; Б) развёртывание интерферограммы по правилу (1.29) в горизонтальном направлении; В) развёртывание интерферограммы по правилу (1.29) в вертикальном направлении (стрелками показаны границы артефакта — «лишней» интерференционной полосы)

Важно отметить, что функция вычетов (1.30) на линии разрыва фазы равна нулю, а положение линии не может быть определено однозначно: добавление постоянного сдвига фазы  $\varphi_0$  ко всей интерферограмме не влияет на местоположение точек разрыва фазы, но изменяет конфигурации линий перехода фазы (рис. 1.11-б,в). Разрывы высших порядков ( $|q| \geq 2$  в формуле 1.30) соединяются несколькими линиями разрыва (рис. 1.12). Следует отметить, что положение точек разрыва фазы напрямую не связано с аналитичностью в данной точке функции комплексной переменной  $\dot{I}(z)$ , описывающей интерферограмму. Так, например, функция  $f(z) = z$  всюду аналитична, однако в точке  $z = 0$  её фаза будет иметь точку разрыва.

Понятие точки разрыва фазы близко, но не тождественно понятию особой точки функции комплексной переменной, из-за чего математический аппарат и методы этой теории находят лишь ограниченное применение в описании и синтезе методов развёртывания



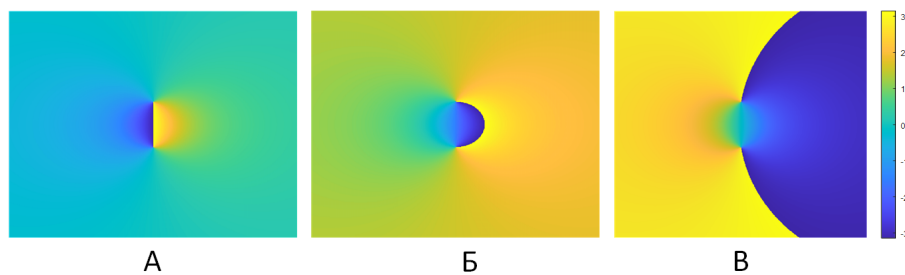


Рис. 1.11: Положение линии разрыва фазы при разных начальных фазах интерферограммы: А)  $\varphi_0 = 0$ ; Б)  $\varphi_0 = \pi/2$ ; В)  $\varphi_0 = 0,95\pi$

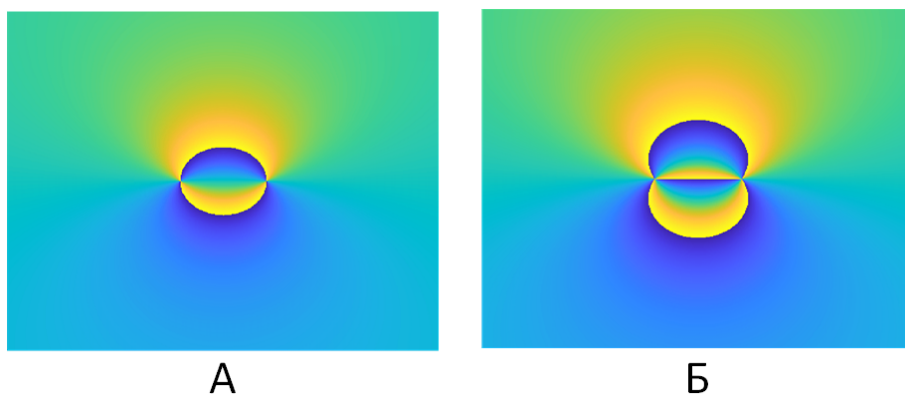


Рис. 1.12: Разрыв второго порядка (А); разрыв третьего порядка (Б)

фазы. И если обнаружение точек разрыва не представляет какой-либо сложности (достаточно реализовать алгоритм линейной сложности в соответствии с выражением (1.30)), то обнаружение линий разрыва требует, как правило, соединения точек в пары по какому-либо критерию (например, минимуму расстояния), что потребует алгоритма квадратичной сложности (относительно количества точек разрыва). Более подробный анализ для получения оптимального решения приводит к необходимости реализации решения *NP*-трудной задачи [34, 38, 55], что затрудняет или делает невозможной интерферометрическую обработку изображений большого размера (более 2 тысяч элементов по каждой стороне) или содержащих большое количество разрывов. Многие алгоритмы развёртывания (в частности, алгоритм растущих регионов) являясь простыми с точки зрения вычислительной сложности, оставляют протяжённые артефакты при обработке областей разрыва большой длины, что приводит к ухудшению точности получаемых ЦМР до величин, сравнимых с аппроксимацией рельефа эквивалентной плоскостью. Алгоритм минимальной стоимости потока, напротив, позволяет разрешить фазовые неоднозначности близким к оптимальному образом, локализуя артефакты развёртывания в минимально возможной области, однако из-за высокой вычислительной сложности без использования приближе-

ний и упрощений он не способен обрабатывать интерферограммы больших размеров, а также непригоден для реализации на параллельных вычислительных устройствах.

На сегодняшний день наибольшее внимание разработке и исследованию методов развёртывания фазы уделяют научные коллективы Японии [60, 61, 62, 105, 106, 107] и Китая [108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115]. В России и бывшем СССР наиболее известны работы в данной области, выполнявшиеся Р.И. Шуваловым [38, 39, 40], А.В. Филатовым [116], М.А. Егошкиным [117], А.В. Ксендзуком [22] и др. По состоянию на 2022 год задача по-прежнему остаётся актуальной: только за период 2021 — IV квартала 2022 года в наукометрической базе данных SCOPUS было индексировано более 620 работ, упоминающих развёртывание фазы (phase unwrapping) в названии, ключевых словах либо аннотации (в том числе в названии — 219 работ), из них в контексте космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли — 49 работ. В 2019 году вышел обзор методов развёртывания фазы [118], где приводятся статистики публикационной активности в области развёртывания фазы за 1995–2017 гг. в разрезе различных способов (в том числе и аппаратных) решения данной задачи. Значительное число докладов, посвящённых задаче развёртывания фазы, представлялось на специализированных конференциях «Fringe», проводимых в 1990 — 2000-х гг. и имевших специализированную секцию по этому вопросу. Помимо космической радиоинтерферометрии задача развёртывания фазы возникает и в других предметных областях, где используются фазовые измерения: профилометрии, биомедицинской диагностике, оптической метрологии [118], дефектоскопии [119] и в других технических отраслях, что делает задачу развёртывания фазы междисциплинарной, а принципиальная необходимость этапа развёртывания фазы для возможности получения корректных результатов — важной научной и технической задачей.

Начало исследований в области развёртывания фазы можно отнести ко второй половине 1970-х гг., и связаны они были, в основном, с кепстральной обработкой сигналов (одномерных и двумерных), получаемых при астрономических измерениях [120, 121, 122]. Первые практические результаты в области космической радиолокационной интерферометрии были продемонстрированы во второй половине 1980-х гг. [52], а развитие радиолокационных космических технологий дистанционного зондирования Земли для картографирования рельефа в 1980-х и 1990-х гг. послужило толчком к развитию методов развёртывания фазы [31, 105, 104, 122, 123] и разработке десятков различных алгоритмов, основанных на использовании математического аппарата из различных предметных обла-

стей: теории векторных полей (метод вставки ветвей отсечения Goldstein Residue Cut [52], метод функций Грина [57]), теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод минимальной стоимости потока — Minimum Cost Flow [56, 104]), теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, метод нелинейной стохастической фильтрации и др.), решении больших систем уравнений (метод наименьших квадратов [124]), генетических алгоритмов [125], нейронных сетей и т.п. В обзорах [30, 34, 40, 91, 107, 109, 114, 126] приводятся упоминания не менее 30 различных алгоритмов развёртывания фазы.

Подробная классификация методов развёртывания фазы приведена в работах [38, 91, 127, 118]. В работе Л.Н. Захаровой [127] проводится качественный сравнительный анализ десяти алгоритмов развёртывания (разворота) фазы (6 локальных и 4 глобальных) по восьми критериям и производится количественное их сравнение по спектральным характеристикам развёрнутой фазы, по которым можно судить о фильтрующих свойствах алгоритмах и наличии крупномасштабных отклонений. В работе Р.И. Шувалова [38] все рассматриваемые алгоритмы классифицируются по применяемому математическому аппарату; характеру работы с интерферограммой — локальные и глобальные; типу применяемой регуляризации (вычисления абсолютной фазы) — поиск добавочного поля, формирование системы разрезов, взвешенное осреднение; классу гладкости получаемого решения; конгруэнтности решения исходной фазы и классу вычислительной сложности. Конгруэнтность заключается в выполнении следующего соотношения:

$$W\{\hat{\Psi}_{m,n}\} = \Delta\varphi_{m,n} + \text{const}, \quad (1.31)$$

т.е. при свёртывании абсолютной фазы восстанавливается картина относительной фазы (с точностью до постоянного слагаемого). Многие алгоритмы развёртывания не сохраняют конгруэнтность фазы (например, метод функций Грина, метод наименьших квадратов и др.), однако это может свидетельствовать о сглаживании алгоритмом деталей интерферограммы в процессе развёртывания, что часто приводит к снижению точности восстановленной абсолютной фазы и продуктов её дальнейшей обработки. Также следует отметить, что большая часть алгоритмов развёртывания, в том числе и считающиеся наиболее эффективными, используют оптимизационные и сетевые подходы, и возможности ускорения их выполнения за счёт распараллеливания вычислений крайне ограничены.

Исторически первый алгоритм двумерного развёртывания фазы при обработке радиолокационных данных ДЗЗ — алгоритм вставки ветвей отсечения (алгоритм Голдштейна,

Goldstein residue-cut algorithm [52]) — заключается в соединении точек разрыва по методу дерева Штейнера и является *NP*-трудным. Данный алгоритм формирует кусочно-непрерывное решение, конгруэнтное полю относительной фазы, по классификации [38] относится к локальным методам развёртывания, основанным на формировании системы разрезов.

Другой подход к двумерному развёртыванию фазы был разработан в 1994 году [124] и получил название метода наименьших квадратов (least-square method). Он заключается в минимизации суммы квадратов разностей градиента относительной фазы и оценки фазы, для чего решается система из  $M_I \times N_I$  уравнений вида:

$$\begin{aligned} \Psi_{m+1,n} + \Psi_{m-1,n} + \Psi_{m,n-1} + \Psi_{m,n+1} &= L_{m,n}, \\ L_{m,n} &= \left( \Delta_{m,n}^x - \Delta_{m-1,n}^x \right) - \left( \Delta_{m,n}^y - \Delta_{m-1,n}^y \right), \\ \Delta_{m,n}^x &= W \{ \varphi_{m,n} - \varphi_{m-1,n} \}, \\ \Delta_{m,n}^y &= W \{ \varphi_{m,n} - \varphi_{m,n-1} \}, \end{aligned} \tag{1.32}$$

где  $M_I, N_I$  — размеры интерферограммы. Это уравнение представляет собой дискретную версию уравнения Пуассона. Для ускорения вычислений используется быстрое преобразование Фурье, применяемое к массиву  $L_{m,n}$ . Данный алгоритм формирует непрерывное решение, неконгруэнтное полю относительной фазы, его вычислительная сложность будет квадратичной.

Ещё один подход основан на рассмотрении задачи развёртывания фазы как оптимизационной. Один из первых методов, использующий данный подход, — метод целочисленной оптимизации (метод Константины) [56]. Он основан на минимизации целевой функции, сводящейся к решению системы линейных алгебраических уравнений определённого вида [56, 91]. Алгоритм относительно легко реализуется программно, формирует решение, конгруэнтное полю относительной фазы, однако его сложность будет квадратичной, а параллельная реализация — затруднительной. Другой оптимизационный метод, получивший наибольшее распространение, — метод минимальной стоимости потоков (minimum cost flow, MCF/SNAPHU [55, 59]), основанный на решении оптимизационной задачи минимизации целевой функции вида:

$$\sum_m \sum_n g_{m,n} \cdot (\text{grad } \varphi_{m,n} - \text{grad } \Psi_{m,n}) \rightarrow \min, \tag{1.33}$$

где  $g_{m,n}$  – весовая функция, включающая правила вычисления нормы  $L^p$  [59]. Этот метод развёртывания относится к глобальным и формирует решение, конгруэнтное полю относительной фазы; в зависимости от используемой нормы сложность алгоритма может быть как полиномиальной (второго порядка), так и  $NP$ -типа. По классификации [38] метод относится к глобальным, формирующим добавочное поле, результирующая абсолютная фаза конгруэнтна относительной фазе. Данный алгоритм наиболее широко применяется при интерферометрической обработке радиолокационных данных ДЗЗ, он реализован практически во всех соответствующих программных комплексах, однако возможности параллельной реализации этого алгоритма, а также применения его к интерферограммам больших размеров, в том числе интерферограмм РСА сверхвысокого разрешения, оказываются ограниченными.

Алгоритм, хорошо пригодный для параллельной реализации и имеющий линейную вычислительную сложность предложен в работах Аоки [105], Томиоки [60] для развёртывания фазы интерферограмм, получаемых системами технической диагностики изделий. В этом алгоритме используется прямое устранение точек разрыва с использованием вихря фазы  $\delta\bar{\varphi}$  следующего вида:

$$\delta\bar{\varphi} = \pm \operatorname{arctg} \left\{ \frac{m - m_{0/p}}{n - n_{0/p}} \right\}, \quad (1.34)$$

где  $m_{0/p}$ ,  $n_{0/p}$  — координаты точки разрыва, в которую добавляется вихрь. После такого устранения разрывов абсолютная фаза восстанавливается с использованием (1.29). Однако этот подход приводит к неконгруэнтному решению (рис. 1.13), а в ряде описанных случаев не позволяет получить корректное решение из-за появления остаточных разрывов фазы. Предлагаемые далее (глава 2 настоящей работы) метод развёртывания фазы и реализующий его алгоритм также используют прямое устранение точек разрыва с использованием модели аналогичной модели вихря фазы, однако за счёт использования различных преобразований получаемого вихревого поля метод позволит получать конгруэнтное решение и уменьшать ошибки абсолютной фазы.

Таким образом, разработка нового алгоритма развёртывания фазы с высокой вычислительной эффективностью и экспериментально обоснованной высокой точностью восстановления абсолютной фазы является актуальной научно-технической задачей, направленной на повышение точности картографических и геодезических данных, получаемых ме-

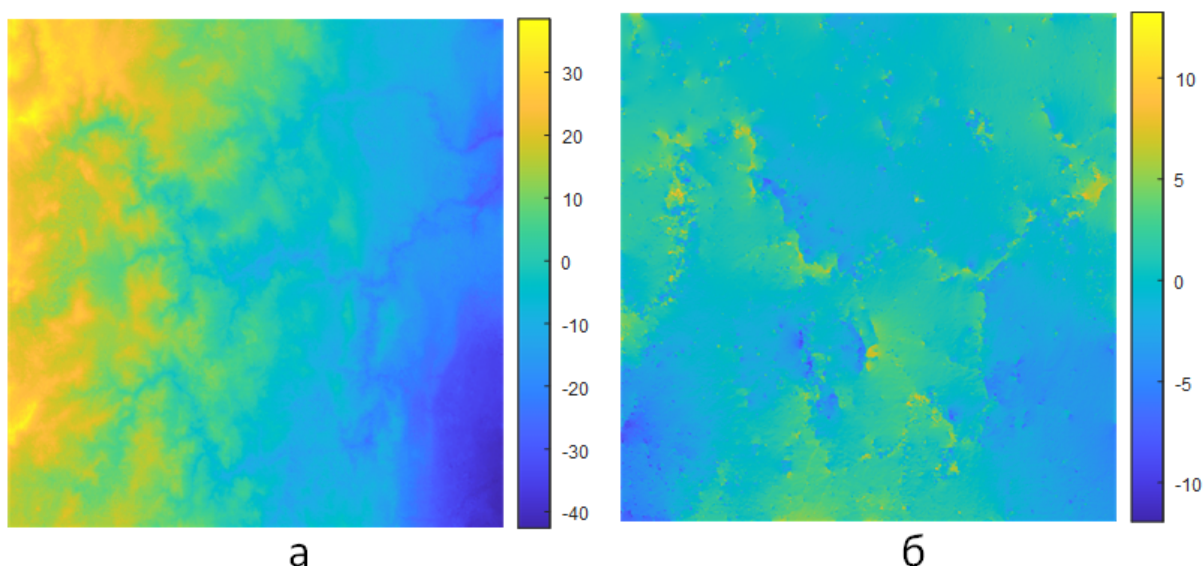


Рис. 1.13: Вымывание деталей при однократном развёртывании: безразрывная восстановленная абсолютная фаза (а) и её отличие от восстановленной абсолютной фазы при сохранении конгруэнтности (б, алгоритм MCF)

тодом радиолокационной интерферометрии. Задаче повышения эффективности развёртывания фазы путём разработки метода и реализующего его алгоритма с вычислительной сложностью, линейно зависящей от количества разрывов фазы, и пригодного для реализации на параллельных вычислительных устройствах, посвящена глава 2 настоящей работы, а задаче экспериментального исследования точности абсолютной фазы, получаемой с его использованием — материалы глав 3 и 4 настоящей работы.

### 1.5 Проблематика оценивания эффективности этапов интерферометрической обработки данных космических РСА

Актуальность задачи оценивания точности высот рельефа, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных ДЗЗ, стала очевидна с первых лет использования данной технологии. Оценка точности РСА-интерферометра Грэхэма [72] проводилась путём многократных наблюдений 36 хорошо опознаваемых контрольных точек и последующего вычисления с.к.о. интерферометрических фаз (по критерию «1 $\sigma$ »), полученных по этим наблюдениям. Полученное значение в 0,2 мрад (при длине волны зондирующего сигнала 3 см) рассматривалось как достаточное для составления топографических карт масштаба 1:250 000. Голдштейн и Цебкер [47] оценивали погрешности измерений высоты авиаинтерферометром CV990 путём сравнения с картографическими

данными только для пяти точек интерферограммы (фазовая неоднозначность разрешалась вручную), не делая подробных обобщающих выводов о точности.

По мере накопления экспериментальных данных космической РСА-интерферометрии во второй половине 1980-х — 1-й половине 1990-х гг. (SEASAT, SIR-B, «Алмаз-1», ERS-1/2) вопросам оценки точности путём сравнения с эталонными высотами стало уделяться ещё больше внимания. В качестве основного численного критерия оценки точности высот ЦМР традиционно используется среднеквадратическая ошибка (root mean square error, RMSE [128]):

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\sum_i (\hat{H}_i - H_{0i})^2 / N_{GCP}}, \quad (1.35)$$

где  $\hat{H}_i$  — измеренные значения высот в контрольных точках,  $H_{0i}$  — эталонные значения высот,  $N_{GCP}$  — количество контрольных точек. В [128] отмечается, что в ряде случаев такая оценка может давать искажённые результаты и предлагается отдельно учитывать математическое ожидание  $u_H$  разностей  $(\hat{H}_i - H_{0i})$  и их среднеквадратичное отклонение (с.к.о.)  $\sigma_H$  в виде:

$$Acc = u_H \pm \sigma_H, \quad (1.36)$$

где:

$$\sigma_H = \sqrt{\sum_i [(\hat{H}_i - H_{0i}) - u_H]^2 / N_{GCP}}. \quad (1.37)$$

Тем не менее, наиболее универсальным [20] и распространённым критерием оценки точности измерения высот, совместимым со стандартами картографо-геодезической отрасли многих государств было и остаётся среднеквадратичное отклонение измеренных и эталонных высот [129]:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{N_{GCP} - 1} \sum_i (\hat{H}_i - H_{0i})^2}, \quad (1.38)$$

которое далее (главы 3–4) и будет использоваться для оценивания точности высот ЦМР, аналогичное выражение будет использоваться для оценки точности абсолютной фазы.

Помимо приведённых выше показателей, целесообразен также и расчёт дополнительных показателей точности, имеющих применение в картографо-геодезической отрасли:

— абсолютная точность высот (линейная ошибка) с доверительной вероятностью 0,9: данный показатель широко используется в зарубежных картографо-геодезических измерениях, в частности, американскими стандартами NMAS и FGDC [130], и тесно связан с показателем среднеквадратичного отклонения высот в случае нормального распределе-

ния ошибки:

$$\sigma_{LE90} = 1,646\sigma_H; \quad (1.39)$$

— максимальное расхождение высот в контрольной точке  $M_h$ , которое также используют некоторые картографические нормы и правила:

$$M_H = \max_i \{ \hat{H}_i(m_i, n_i) - H_i(X_i, Y_i) \}. \quad (1.40)$$

Ещё одним дополнительным к приведённым выше и широко применяемым способом «более тонкой» оценки вертикальной точности при наличии большого числа контрольных точек является построение и анализ гистограмм разностей ( $\hat{H}_i - H_{0i}$ ).

Значительное количество работ, посвящённых оценке точности ЦМР, получаемых интерферометрическими РСА, появилось в 2000-х гг., что связано, с одной стороны, с успешным выполнением миссии SRTM в феврале 2000 г., а с другой — с прекращением практики искусственного загробления навигационных сигналов системы GPS в мае 2000 г., что сделало доступным новые способы получения эталонных высот — стационарные и кинематические («GPS-трекинг») навигационные измерения.

Важной вехой в исследованиях точности интерферометрического метода в целом стал вышедший в 2005 году отчёт о поверке (валидации) точности высотных данных, полученных миссией SRTM [1]. Поверка производилась с использованием кинематических GPS-измерений 86 тыс. наземных контрольных точек и других эталонных данных. Результаты были представлены в виде, аналогичном (1.30), но с использованием LE90 вместо с.к.о., и гистограмм распределения ошибки. Сами ошибки вычислялись в пределах отдельных континентов. Исследовались «абсолютная» (в пределах континента в целом) и «относительная» (в пределах градусного листа) ошибки, а также плановая ошибка («Absolute geolocation error»). При ожидавшихся значениях «абсолютной» и «относительной» ошибок измерения высот (по критерию LE90) в 16 м и 10 м соответственно [1, 99], были получены значения от 5,6 до 9,0 м для «абсолютной» ошибки и от 4,7 м до 9,8 м для «относительной», что оказалось лучше ожидаемых значений и подтвердило эффективность интерферометрического метода оценки высот рельефа. В ряде других работ по оценке точности SRTM с использованием данных GPS [131, 132, 133], цифровых топографических карт крупных масштабов [97] и лазерных высотомеров [134, 135, 136] были получены значения ошибки измерения высот от 2,0 до 8,2 метров (по критериям RMSE и с.к.о.) с



увеличениям до 12–18 метров в высокогорных районах.

Также большое количество работ посвящено оценке точности SRTM и других интерферометрических моделей рельефа (ERS-1/2, TanDEM-X, GAOFEN-3 INSAR DEM и др.) для конкретных регионов в разных частях земного шара: SCOPUS по запросу «InSAR» и «assurasy» предлагается 39 публикаций за период с 1997 по 2022 гг. по названию и 380 — по названию и ключевым словам, что свидетельствует об актуальности тематики. Из содержания работ можно сделать вывод о том, что наиболее часто используемыми эталонными данными для оценивания точности ЦМР, получаемых радиолокационной интерферометрической съемкой, являются GPS-измерения, цифровые топографические карты разных масштабов и данные геодезических сетей, т.е. почти во всех случаях использовались эталоны в виде облака (массива) точек. Разброс получаемых оценок точности обусловлен как детальностью эталонных данных, так и характером рельефа местности. При этом практически во всех работах рассматривается и обсуждается точность интерферометрического метода построения ЦМР в целом («an end-to-end InSAR DEM validation» [137]), но почти не затрагиваются вопросы, связанные с эффективностью применения конкретных алгоритмов интерферометрической обработки. Однако, существенное влияние методов обработки на качество получаемого результата отмечается в обзорных работах и монографиях [34, 38]. В тех же работах, где эффективность отдельных алгоритмов всё же исследуется, используются либо завершение последовательности интерферометрической обработки [7, 38], либо имитационное моделирование [12, 138], либо сравнение результатов по косвенным признакам [127, 139]. Смолл и Ньюэш [137] предлагают 3 различных подхода к экспериментальной оценке точности высот, получаемых при РСА-интерферометрии:

— компенсация фазового уклона (выравнивание) с использованием дополнительно фазового поля  $\Phi_{m,n}^C$ , построенного по эталонной ЦМР сопоставимой точности («DEM Flattening using synthetic interferogram»);

— обратное геокодирование («Backward geocoding»), заключающееся в преобразовании эталонной ЦМР в полётную систему координат и сравнение абсолютных фаз;

— прямое геокодирование («Forward geocoding») абсолютной фазы в геодезическую систему координат и сравнение высот.

Авторы работы [137] отдают предпочтение последнему варианту как обеспечивающему полную сквозную поверку технологии построения ЦМР с использованием РСА-

интерферометрии («a true end-to-end validation of the InSAR height model generation process»). Однако, очевидно, такой подход осложняет исследование эффективности конкретных алгоритмов, реализующих отдельные этапы обработки, поскольку невозможно разделить вклад различных источников ошибок в итоговый результат. Также, при сквозной проверке становится невозможной автоматизация перебора параметров алгоритмов, поскольку при каждом исследуемом наборе параметров потребуется завершать все этапы обработки, и, в том числе, производить ручную контролируруемую геопривязку.

При проведении обзора научных работ по оцениванию точности результатов интерферометрической обработки не было выявлено работ, рассматривающих экспериментальное измерение точности результатов, получаемых на начальных и промежуточных этапах интерферометрической обработки (фильтрации фазового шума, развёртывании фазы). Таким образом, является актуальной задача разработки методик оценивания точности результатов интерферометрической обработки, при использовании которых был бы возможен автоматический перебор комбинаций параметров исследуемых алгоритмов и автоматический перебор самих используемых алгоритмов без завершения всех этапов интерферометрической обработки. Набор таких методик позволит оценивать точность результатов применения алгоритмов или приёмов интерферометрической обработки и, таким образом, повысить эффективность обработки. Разработке методики экспериментального оценивания точности абсолютной фазы и высот ЦМР при развёртывании фазы, методики экспериментального оценивания точности интерферометрической фазы после подавления фазового шума и сравнения способов оценивания когерентности посвящена глава 3 настоящей работы.

## **1.6 Выводы по главе 1**

1. Выполнен аналитический обзор принципов, этапов и проблем, связанных с реализацией интерферометрической обработки данных космических РСА высокого и сверхвысокого пространственного разрешения при построении и оценке точности ЦМР рельефа земной поверхности. Рассмотрены методы и алгоритмы, используемые на различных этапах интерферометрической обработки данных космических РСА: взаимопривязка РЛИ и формирование интерферограммы путём поэлементного перемножения двух КРЛИ; компенсация фазового набега (выравнивание фазы); фильтрация интерферограммы; устране-

ние фазовой неоднозначности (развёртывание фазы); геопривязка (переход от полётной системы координат к географической системе координат).

2. Предложено математическое описание комплексных РЛИ и получаемых из них интерферограмм в дискретных координатах («путевая дальность — наклонная дальность»). Показано, что интерферограмма включает составляющие фазы, связанные с рельефом местности (топографическая фаза), его изменениями за время между радиолокационными съёмками (дифференциальная топографическая фаза), изменением условий распространения радиоволн в атмосфере и фазовым шумом. Показано, что основными задачами интерферометрической обработки являются подавление фазового шума и развёртывание фазы.

3. Проанализированы источники ошибок абсолютной фазы и высоты цифровых моделей рельефа. Показано, что основной вклад в итоговую ошибку вносят геометрические ошибки, связанные с неточностью измерений интерферометрической базы и её ориентации в пространстве, временная и пространственная декорреляции отражённых сигналов, порождающие фазовый шум, и неоднозначность решения задачи развёртывания фазы. Для уменьшения геометрических ошибок необходимо использование наземных опорных точек при геопривязке абсолютной фазы, для снижения уровня фазового шума — использование фильтров и накопление соседних отсчётов интерферограммы, а для уменьшения влияния артефактов развёртывания фазы при наличии разрывов фазы — совершенствование методов и алгоритмов развёртывания фазы.

4. Показано, что развёртывание фазы до сих пор остаётся самым проблемным этапом радиолокационной интерферометрической обработки, поскольку подобная задача является *NP*-трудной и в принципе не имеет однозначного решения. Основной подход к развёртыванию фазы заключается в интегрировании фазового градиента, что в дискретной постановке задачи осуществляется путём вычисления разностей фаз соседних элементов со свёртыванием их в интервал однозначности  $[-\pi, \pi)$  и последующим суммированием полученных разностей. Решение задачи осложняется тем, что при наличии разрывов фазы возникает зависимость результата развёртывания от направления суммирования разностей. Для решения задачи развёртывания фазы разработано несколько десятков алгоритмов, основанных на аппарате из различных областей современной математики: от теории векторных полей (метод Гольдштейна, метод функций Грина) и теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод оптимизации сетевых потоков) до теории

фильтрации (фильтрация Калмана, нелинейная стохастическая фильтрация и др.), генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п.

5. Проведён обзор методов экспериментального оценивания точности высот ЦМР, получаемых при интерферометрической обработке. Показано, что существующие методики предполагают полное её завершение и последующее сравнение результата с эталоном — картографической ЦМР, данными глобальных радионавигационных систем, результатами лазерной съёмки. Однако при таком подходе существенно затруднена оценка эффективности выполнения отдельных этапов интерферометрической обработки (развёртывания фазы, подавления фазового шума, накопления). Поэтому актуальной задачей является разработка методик оценивания точности абсолютной фазы и высоты рельефа, не требующих выполнения всех этапов обработки.

6. Уточнены задачи диссертационного исследования:

*1. Создание уточнённой дискретной модели интерферограммы, учитывающей разрывы фазы;*

*2. Разработка метода и алгоритма, реализующих процедуру развёртывания фазы для интерферограмм больших размеров в условиях наличия большого количества разрывов фазы;*

*3. Создание методик экспериментальной оценки точности результатов отдельных этапов интерферометрической обработки (развёртывания фазы, подавления фазового шума, накопления, оценивания когерентности), включающей требования к тестовому участку, процедуру построения эталонной ЦМР, процедуру пересчёта массива эталонных высот в массивы эталонных абсолютных фаз, критерии оценки качества построенной ЦМР;*

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

## МЕТОД РАЗВЕРТЫВАНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ

*Предложена математическая модель интерферометрической фазы и её типичных разрывов, препятствующих однозначному развёртыванию фазы. Предложен новый метод развёртывания фазы, основанный на построении встречного вихревого поля фазы и рекурсивном подавлении его низкочастотных флуктуаций. Разработан алгоритм, реализующий предложенный метод. Работоспособность алгоритма подтверждена на примерах, содержащих типовые сцены с разрывами фазы.*

### 2.1 Математическая модель интерферометрической фазы и её разрывов

Интерферограммы, получаемые радиолокаторами с синтезированной апертурой, представляют собой двумерные дискретные нестационарные случайные процессы, значения которых лежат в диапазоне  $[-\pi..\pi)$ , при этом конкретная реализация случайного процесса определяется топографией местности, шумами и другими факторами в соответствии с соотношением (1.15). Для математического описания интерферометрической фазы в работе [140] нами предложено использовать её представление в виде комплексной интерферограммы — функции комплексной переменной  $I(z)$ , составленной следующим образом:

$$I(z) = e^{j\Delta\varphi_{m,n}} \Big|_{z=m+j \cdot n}, \quad (2.1)$$

где  $z = m + j \cdot n$  — дискретный комплексный аргумент функции, описывающей интерферограмму. Данное представление можно использовать на всех этапах интерферометрической обработки. Такая модель позволяет компактным образом описывать разрывы фазы интерферограммы и ошибки абсолютной фазы после развёртывания. Вместе с тем нами в [141] и далее в разделе 4.5 настоящей работы экспериментально показано, что отказ от использования такой информации при межэлементном некогерентном накоплении и фильтрации фазового шума не только не снижает точность результата обработки, но и напротив, может привести к её повышению на 5–15%. Также в разделе 4.4 настоящей работы показано, что оценки когерентности интерферометрических пар КРЛИ, не использующие амплитудную информацию, лучше предсказывать снижение точности абсолютной фазы под действием фазового шума и обладают меньшей вычислительной сложностью.

Модель позволяет эквивалентно описывать интерферограммы, отличающиеся только

постоянным сдвигом фазы (рис. 1.11) или линейным уклоном фазы вдоль интерферограммы (рис. 2.1). Такие интерферограммы могут быть взаимно однозначно преобразованы друг в друга путём умножения на величину

$$\exp \left\{ 2\pi j \left( \omega_m \frac{m}{M_I} + \omega_n \frac{n}{N_I} \right) \right\}, \quad (2.2)$$

где  $\omega_m, \omega_n$  — линейные составляющие набега фазы (углы уклона фазы). Однако, результаты дальнейшей интерферометрической обработки эквивалентных интерферограмм будут отличаться, и наилучшую точность результата будет обеспечивать интерферограмма с нулевым средним значением фазы и нулевыми значениями линейных составляющих набега фазы. Для получения такой интерферограммы предлагается после этапа компенсации фазового уклона при интерферометрической обработке производить деление результата на (2.2):

$$\tilde{I}(z) = I(z) / \exp \left\{ 2\pi j \left( \omega_m \frac{m}{M_I} + \omega_n \frac{n}{N_I} \right) \right\} = I(z) \exp \left\{ -2\pi j \left( \omega_m \frac{m}{M_I} + \omega_n \frac{n}{N_I} \right) \right\} \quad (2.3)$$

и затем производить деление на  $\exp \left\{ j M \{ \arg \{ \tilde{I}(z) \} \} \right\}$ , где  $M \{ \arg \{ \tilde{I}(z) \} \}$  — математическое ожидание фазы интерферограммы  $\tilde{I}(z)$ . Оценки линейных составляющих набега фазы при этом вычисляются с использованием быстрого преобразования Фурье:

$$[\hat{\omega}_m, \hat{\omega}_n] = \underset{m,n}{\operatorname{argmax}} \{ \mathfrak{F}[I(z)] \}_{z=m+j \cdot n}, \quad (2.4)$$

где  $\mathfrak{F}[\cdot]$  — символическое обозначение двумерного быстрого преобразования Фурье.

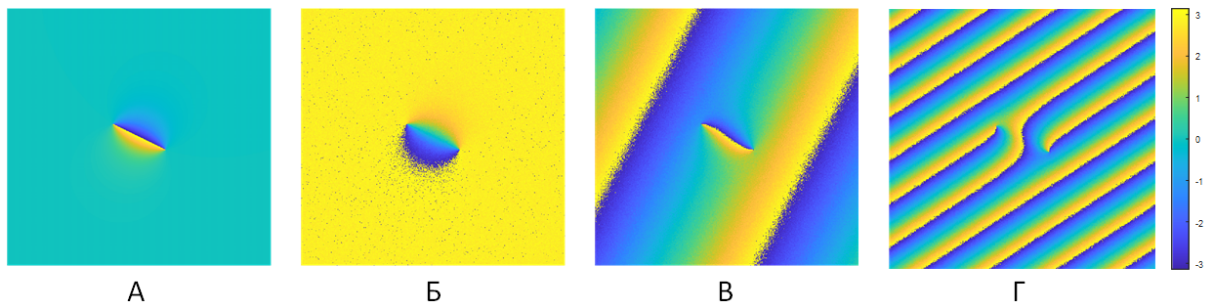


Рис. 2.1: Эквивалентные формы интерферограммы: интерферограмма с нулевым средним значением и нулевыми составляющими уклонов фазы (А), интерферограмма с ненулевым средним значением фазы (Б), интерферограммы с разными ненулевыми значениями уклонов фазы (В, Г)

В публикациях, посвященных вопросам развёртывания фазы, источниками возникновения разрывов указываются, как правило, фазовый шум и эффекты наложения [38, 91], исходя из чего, можно предложить следующую классификацию разрывов фазы и соответствующих им математических моделей.

**Разрыв I типа** (элементарный разрыв) — разрыв фазы, охватывающий 2 смежных элемента интерферограммы, причём разность фаз этих элементов будет по модулю превосходить  $\pi$ , а линия разрыва фазы в этом случае не образуется. Причиной появления таких разрывов является действие фазового шума. Простое развёртывание фазы (1.29) по направлению, проходящему через оба этих элемента, будет приводить к ошибке развёртывания фазы в виде лишней интерференционной полосы шириной в 1 элемент (рис. 2.1-В). Модель такого разрыва в направлении координаты  $m$  (рис. 2.1-А) следующая:

$$\Delta\varphi_{m,n}^{(1)} = \begin{cases} \pm\varphi_0, & m = m_0, n = n_0 \\ \mp\varphi_0, & m = m_0 + 1, n = n_0 \\ 0, & m \neq \{m_0, m_0 + 1\} \wedge n \neq n_0, \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $(m_0, n_0)$  — координаты разрыва,  $\pi/2 < \varphi_0 < \pi$ . Комплексная интерферограмма разрыва будет иметь следующий вид:

$$\dot{I}_1(z) = \exp\left(j\Delta\varphi_{m,n}^{(1)}\right) \Big|_{z=m+jn}.$$

Схожим образом будут выглядеть модели разрывов в направлении координаты  $n$  (рис. 2.1-Б) и в диагональном направлении.

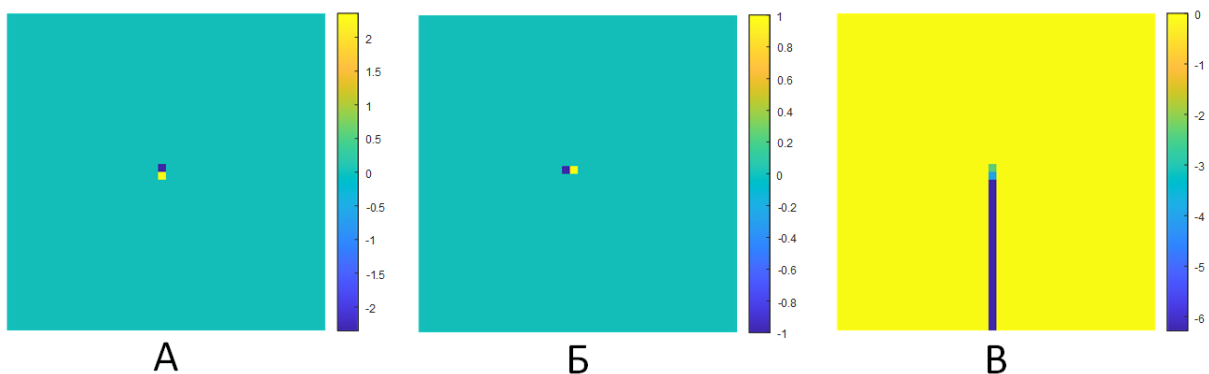


Рис. 2.2: Элементарный разрыв (А), его функция вычетов (Б) и абсолютная фаза, восстановленная по правилу (1.29) (В)

Развёртывание фазы в окрестности разрывов I типа не представляет какой-либо сложности и может быть выполнено, например, следующим образом: фазы элементов интерферограммы  $\Delta\varphi_{m,n}$ , соответствующие положению такого разрыва, заменяются на нулевые значения, вследствие чего разности фаз соседних элементов не смогут превысить по модулю величины  $\pi$ , и разрыв исчезает. Новая интерферограмма  $\Delta\overset{\circ}{\varphi}_{m,n}$  (если она не содержит иных разрывов) может быть развёрнута по алгоритму, реализующему выражение (1.29), а сохранение конгруэнтности абсолютной фазы можно реализовать путём введения поправки:

$$\hat{\Psi}_{m,n} = \overset{\circ}{\Psi}_{m,n} + \arg \left\{ \frac{\overset{\circ}{I}_I(z)}{\overset{\circ}{I}_I(z)} \right\}, \quad (2.6)$$

где  $\overset{\circ}{\Psi}_{m,n}$  — абсолютная фаза, полученная развёртыванием  $\Delta\overset{\circ}{\varphi}_{m,n}$  по правилу (1.29),  $\overset{\circ}{I}_I(z) = \exp\{\Delta\overset{\circ}{\varphi}_{m,n}\}|_{z=m+j\cdot n}$ .

**Разрыв фазы II типа** (протяжённый разрыв) — разрыв, образующийся, как правило, в областях наложений эхо-сигналов — на выступах рельефа с высокой крутизной ската, превышающей угол падения антенного луча  $\theta_0$ . Простейшей моделью такого разрыва будет комплексная интерферограмма следующего вида:

$$\overset{\circ}{I}_{II}(z) = \exp \left[ j \arg \left\{ \frac{z - z_{01}}{z - z_{p1}} \right\} \right], \quad (2.7)$$

где  $z_{01}$  и  $z_{p1}$  — координаты точек разрыва фазы, которые представляют собой, соответственно, нуль и полюс функции комплексной переменной, стоящей под операцией вычисления аргумента. Использование комплексного экспоненциального представления вида  $\exp(j \arg\{\cdot\})$  в (2.7) позволяет игнорировать значения амплитуд интерферограмм и используемых функций комплексной переменной для предотвращения ошибок вычисления, связанных с переполнением или потерей значимости величин. Примеры разрывов II типа представлены на рис. 1.11 и 1.12, и такие разрывы представляют наибольшую проблему при восстановлении абсолютной фазы из-за отсутствия возможности однозначно выбрать путь интегрирования при развёртывании по правилу (1.29).

**Разрыв III типа** (кольцевой разрыв) — разрыв, при котором образуется не отдельная линия, а область или совокупность областей, окружённых точками разрыва. Такие разрывы являются следствием дискретного характера интерферограммы и могут возникать при появлении областей уклона фазы, превышающего по модулю  $\pi$  (рис. 2.1). Модель такого



разрыва может быть следующей:

$$\dot{I}_{\text{III}}(z) = \exp \left[ jH_{\text{III}} \cdot \exp \left( -\frac{|z|^2}{2A_{\text{III}}^2} \right) \right] \quad (2.8)$$

где параметры  $H_{\text{III}}$  и  $A_{\text{III}}$  подбираются так, чтобы в окрестности окружности  $|z| = A_{\text{III}}$  производная аргумента  $\dot{I}(z)$  в радиальном направлении превышала  $\pi$ , что выполняется, если

$$H_{\text{III}} > \pi\sqrt{e} \cdot A_{\text{III}}. \quad (2.9)$$

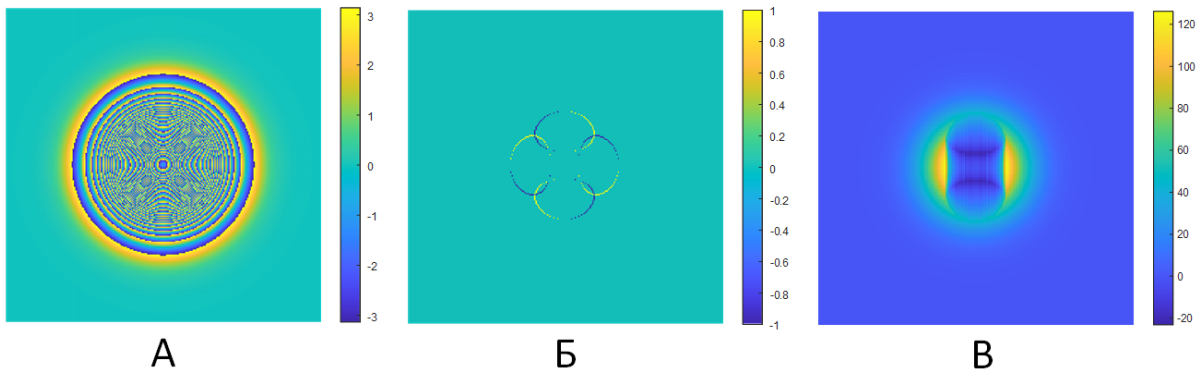


Рис. 2.3: Разрыв III типа (А), его функция вычетов (Б) и абсолютная фаза, восстановленная по правилу (1.29) (В)

Стоит отметить, что если рассматривать (2.8) как функцию комплексной переменной, то она не будет иметь ни нулей, ни особых точек.

Перечисленные разрывные нарушения двумерной интерферометрической фазы (особенно первого и второго типа) встречаются практически на любых интерферограммах, получаемых радиолокационными системами ДЗЗ. Поэтому неотъемлемым требованием к эффективному методу развёртывания интерферометрической фазы является его способность разрешать неоднозначности так, чтобы оставшиеся артефакты развёртывания фазы локализовывались в как можно меньшей области в окрестности разрыва. В разделе 2.2 настоящей работы описан новый метод такого развёртывания, где локализация повреждённых областей осуществляется за счёт построения добавочного поля фазы определённого вида и дальнейших его преобразований, направленных на уменьшение ошибок развёртывания фазы.

## 2.2 Развёртывание фазы методом выравнивания встречного вихревого поля

Поскольку значительное число разрывов фазы на интерферограммах радиолокационных систем ДЗЗ можно отнести к разрывам II типа, то целесообразно любой вновь создаваемый метод развёртывания конструировать так, чтобы эффективно развёртывать фазу в окрестностях именно таких разрывов. Суть предложенного нами в [142, 143, 144, 145] метода выравнивания встречного вихревого поля фазы заключается в непосредственном устранении разрывов искусственными разрывами (элементарными вихрями фазы) встречного направления, формирующими встречное вихревое поле фазы, рекурсивном выравнивании встречного вихревого поля фазы и его адаптивной фильтрации. Остаточная интерферограмма, в свою очередь, используется для обеспечения конгруэнтности восстановленной абсолютной фазы исходной интерферометрической фазе.

Согласно модели (2.7) точки разрыва фазы II типа с положительным знаком будут приближённо соответствовать полюсу  $q$ -го порядка функции комплексной переменной  $I(z)$ , а с отрицательным — её нулю  $q$ -го порядка (при вычислении функции вычетов по правилу 1.30). Таким образом, непрерывность фазы может быть восстановлена, если в каждую точку разрыва положительного знака искусственно поместить нуль  $q$ -го порядка следующего вида:

$$J(z)^- = \exp(-j \cdot q \cdot \arg\{z - z_p\}), \quad (2.10)$$

где  $z_p = m_p + jn_p$  —местоположение точки разрыва  $q$ -го порядка с положительным знаком. Аналогично, для точек разрыва с отрицательным знаком непрерывность фазы восстанавливается полюсом  $q$ -го порядка следующего вида:

$$J(z)^+ = \exp(j \cdot q \cdot \arg\{z - z_0\}), \quad (2.11)$$

где  $z_0 = m_0 + jn_0$  —местоположение точки разрыва  $q$ -го порядка с отрицательным знаком. Искусственные нули и полюсы (2.10) и (2.11) далее будут именоваться элементарными вихрями фазы, а их совокупность для конкретной интерферограммы — встречным вихревым полем фазы  $\dot{C}_*(z)$ :

$$\dot{C}_*(z) = \exp \left[ j \cdot \arg \left\{ \frac{(z - z_{p1})^{q_{p1}} (z - z_{p2})^{q_{p2}} \cdots (z - z_{p\mu})^{q_{p\mu}}}{(z - z_{01})^{q_{01}} (z - z_{02})^{q_{02}} \cdots (z - z_{0\mu})^{q_{0\mu}}} \right\} \right], \quad (2.12)$$

где  $\mu, \nu$  — количество точек разрыва интерферограммы положительного и отрицательного знака, соответственно. Число положительных  $\{z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0\mu}\}$  и отрицательных  $\{z_{p1}, z_{p2}, \dots, z_{p\nu}\}$  точек разрыва на интерферограмме не обязательно одинаковое в силу ограниченности её размера (линия разрыва может уходить за границу сцены).

Умножение комплексной интерферограммы  $\dot{I}(z)$  на встречное вихревое поле  $\dot{C}_*(z)$  и последующее развёртывание её фазы по правилу (1.29) должно приводить к исчезновению точек разрыва и формированию безразрывной абсолютной фазы  $\tilde{\Psi}_{m,n}$ :

$$\tilde{\Psi}_{m,n} = \Upsilon_r \left\{ \arg \{ \dot{I}(z) \cdot \dot{C}_*(z) \} \Big|_{z=m+jn} \right\}, \quad (2.13)$$

где  $\Upsilon_r\{\}$  — символическое обозначение развёртывания по правилу (1.29) (рис. 2.4). Выражения (2.10)-(2.13) представляют собой писание метода Томиоки и Аоки [105], записанное с использованием предложенной модели интерферометрической фазы и обобщённое на разрывы произвольного порядка  $q$ . Однако в силу дискретного характера интерферограммы и квантования значений фазы после применения алгоритма Томиоки-Аоки возможно появление новых точек разрыва или их перемещение на новые позиции (рис. 2.5), что провоцирует образование артефактов развёртывания при дальнейшем использовании (1.29). Для компенсации вновь возникших разрывов 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 (2.13). Процедура формирования встречного вихревого поля фазы повторяется до тех пор, пока все неоднозначности не будут полностью разрешены. Итоговое встречное вихревое поле фазы  $C(z)$  будет представлять произведение полей, полученных на отдельных итерациях алгоритма:

$$\dot{C}_{**}(z) = \dot{C}_I(z) \cdot \dot{C}_{\text{II}}(z) \cdot \dot{C}_{\text{III}}(z) \cdot \dots \cdot \dot{C}_{K_{\text{Itr}}}(z), \quad (2.14)$$

где  $\dot{C}_I(z), \dot{C}_{\text{II}}(z), \dots$  — встречные вихревые поля, полученные первой, второй и последующих итерациях алгоритма,  $K_{\text{Itr}}$  — число итераций. Затем к  $\dot{I}(z) \cdot \dot{C}_{**}(z)$  применяется правило (1.29), в результате чего восстанавливается безразрывная абсолютная фаза  $\tilde{\Psi}_{m,n}$  2.13.

Для повышения точности абсолютной фазы и восстановления мелких деталей рельефа предлагается, в отличие от алгоритма Томиоки-Аоки, восстанавливать конгруэнтность абсолютной фазы можно путём добавления остаточной интерферограммы (остаточной

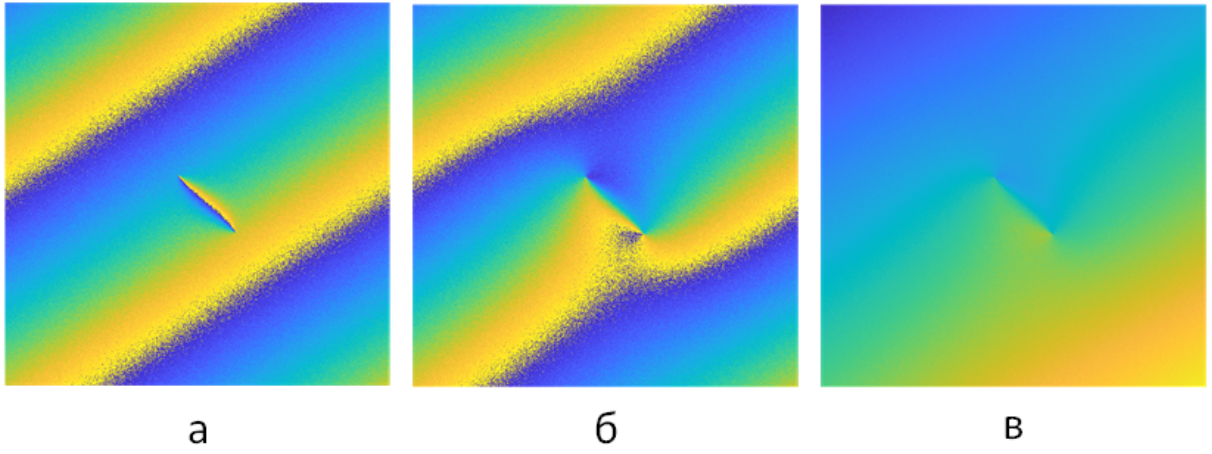


Рис. 2.4: Развёртывание интерферограммы с помощью встречного вихревого поля фазы: а) исходная интерферограмма; б) фаза произведения исходной интерферограммы и встречного вихревого поля; в) развернутая интерферограмма

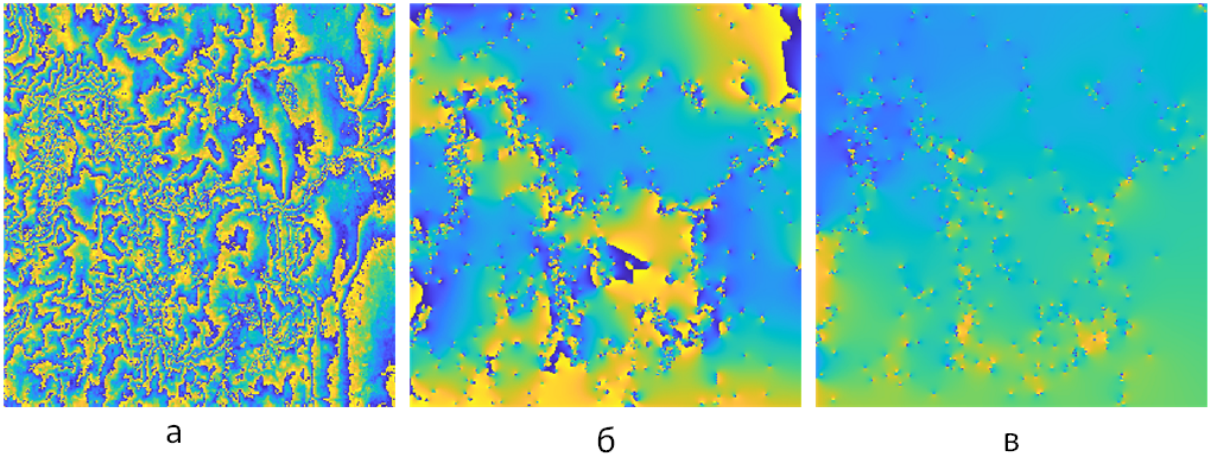


Рис. 2.5: Встречные вихревые поля фазы интерферограммы фазы: исходная интерферограмма (а), встречное вихревое поле фазы после первой итерации (б), встречное вихревое поле фазы после второй итерации (в)

фазы):

$$I_{\delta}(z) = I(z) / e^{j\tilde{\Psi}_{m,n}} \Big|_{z=m+jn} = -\arg \dot{C}_{**}(z), \quad (2.15)$$

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

$$\hat{\Psi}_{m,n} = \tilde{\Psi}_{m,n} + \arg \left\{ I_{\delta}(z) \Big|_{z=m+jn} \right\}. \quad (2.16)$$

Однако, поскольку вид встречного вихревого поля определяется взаимным расположением точек разрыва фазы на интерферограмме и связан с формой рельефа лишь опосредованно, линии разрыва фазы на  $\arg\{I_{\delta}(z)\}$  будут располагаться хаотично, что приведёт к

ряду проблем, приводящих к снижению точности результата:

— в областях концентрации большого количества точек разрыва или в случаях, когда парные точки разрыва отстоят далеко друг от друга, будут возникать низкочастотные флуктуации встречного вихревого поля фазы, размах которых зачастую превышает интервал однозначности фазы, что приводит к появлению лишних интерференционных полос на остаточной интерферограмме (рис.2.6-А), при последующих итерациях флуктуации накапливаются, что может приводить к образованию дополнительных интерференционных полос на остаточной интерферограмме;

— траектории линий разрыва зачастую имеют рваный характер (далее — эффект «бахромы», рис. 2.6-Б);

— даже для близко расположенных пар точек разрыва могут образовываться закругления интерференционных полос, не обусловленные формой рельефа местности (далее — «лунки», рис. 2.6-В), что также приводит к снижению точности восстановленной абсолютной фазы;

— непарные точки разрыва, располагающиеся на краях интерферограммы порождают дополнительные интерференционные полосы на краях и в углах интерферограммы (рис. 2.6-Г).

Таким образом, для повышения точности восстановления абсолютной фазы необходимо так сформировать остаточную интерферограмму, чтобы траектории линий разрыва фазы на ней были как можно более короткими, и предлагаемые далее модификации позволяют существенно подавлять влияние этих эффектов. По аналогии с одним из названий процедуры (1.17) компенсации фазового уклона (выравнивания) интерферограммы при интерферометрической обработке, цель которой состоит в упрощении структуры интерферограммы и снижении числа интерференционных полос, процесс формирования остаточной интерферограммы с подавлением низкочастотных флуктуаций встречного вихревого поля фазы далее будет именоваться выравниванием встречного вихревого поля фазы.

### **Рекурсивное выравнивание встречного вихревого поля фазы**

Для подавления низкочастотных флуктуаций встречного вихревого поля фазы предлагается использовать рекурсивное формирование интерферограммы остаточной фазы, заключающееся в том, что после первой итерации построения встречного вихревого поля фазы (2.12) с помощью фильтра (например, двумерного гауссового) выделяется низкочастотная составляющая полученного встречного вихревого поля (сглаженное встречное

вихревое поле фазы)  $\dot{E}_{\text{Ir}.1}(z)$ , которая, как правило, тоже будет содержать разрывы фазы. Для этой составляющей вновь производится построение встречного вихревого поля  $\dot{C}_{\text{Ir}.2}(z)$ , из которого, в свою очередь, вновь выделяется низкочастотная составляющая, при этом частота среза АЧХ фильтра уменьшается в  $N_f$  раз по сравнению со значением, использованным на предыдущем шаге рекурсии. Рекурсивный спуск с уменьшением значения частоты среза АЧХ фильтра продолжается до тех пор, пока не будет при очередном построении встречного вихревого поля оно не окажется безразрывным:

$$\begin{aligned}
\dot{C}_{\text{Ir}.1}(z) &= \Upsilon_v\{\dot{I}(z)\} \\
\dot{E}_{\text{Ir}.1}(z) &= \Omega_{\gamma_1}\{C_{\text{Ir}.1}(z)\} \\
\dot{C}_{\text{Ir}.2}(z) &= \Upsilon_v\{\dot{E}_{\text{Ir}.1}(z)\} \\
\dot{E}_{\text{Ir}.2}(z) &= \Omega_{\gamma_2}\{C_{\text{Ir}.2}(z)\} \\
&\dots \\
\dot{E}_{\text{Ir}.K_{\text{I-Rc}}}(z) &= \Omega_{\gamma_{K_{\text{I-Rc}}}}\{C_{\text{Ir}.K_{\text{I-Rc}}-1}(z)\},
\end{aligned} \tag{2.17}$$

где  $\Upsilon_v\{\cdot\}$  — символическое обозначение развёртывания по правилу (2.12),  $\Omega_{\gamma_i}\{\cdot\}$  — символическое обозначение низкочастотной гауссовой фильтрации с частотой среза АЧХ фильтра  $F_i$ ,  $\dot{C}_{\text{Ir}.i}(z)$  — встречные вихревые поля после  $i$ -х шагов рекурсии,  $\dot{C}_{\text{Ir}.1}(z) = \dot{i}(z)$ ,  $\dot{E}_{\text{Ir}.i}(z)$  — сглаженные встречные вихревые поля,  $K_{\text{I-Rc}}$  — глубина рекурсивного спуска на  $I$  итерации. Изменение частот фильтра производится по правилу:

$$F_i = F_{i-1}/N_f, \tag{2.18}$$

где  $N_f$  — коэффициент понижения частоты, влияющий на глубину рекурсии и, соответственно, на степень выравнивания поля (далее всюду использовалось значение  $N_f = 4$ ), при этом начальная частота  $F_0$  бралась равной половине максимального размера интерферограммы:  $F_0 = \max\{M_I, N_I\}$ . Далее из встречных вихревых полей, полученных на отдельных шагах рекурсии, формируется вихревое поле первой итерации алгоритма  $\dot{C}_{\text{I-Rc}}(z)$ :

$$\begin{aligned}
\dot{C}_{\text{I-Rc}}(z) &= \dot{C}_{\text{Ir}.1}(z) / (\dot{E}_{\text{Ir}.1}(z) / (\dot{C}_{\text{Ir}.2}(z) / (\dot{E}_{\text{Ir}.2}(z) \dots / \dot{E}_{\text{Ir}.K_{\text{I-Rc}}}(z)))) = \\
&= \frac{C_{\text{Ir}.1}(z)}{\dot{E}_{\text{Ir}.1}(z)} \cdot \frac{C_{\text{Ir}.2}(z)}{\dot{E}_{\text{Ir}.2}(z)} \cdot \dots \cdot \frac{1}{\dot{E}_{\text{Ir}.K_{\text{I-Rc}}}(z)},
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Дальнейшее построение встречного вихревого поля производится аналогично (2.14) с той лишь разницей, что на второй ( $\dot{C}_{\text{Iir}}(z)$ ) и последующих итерациях вычисления также

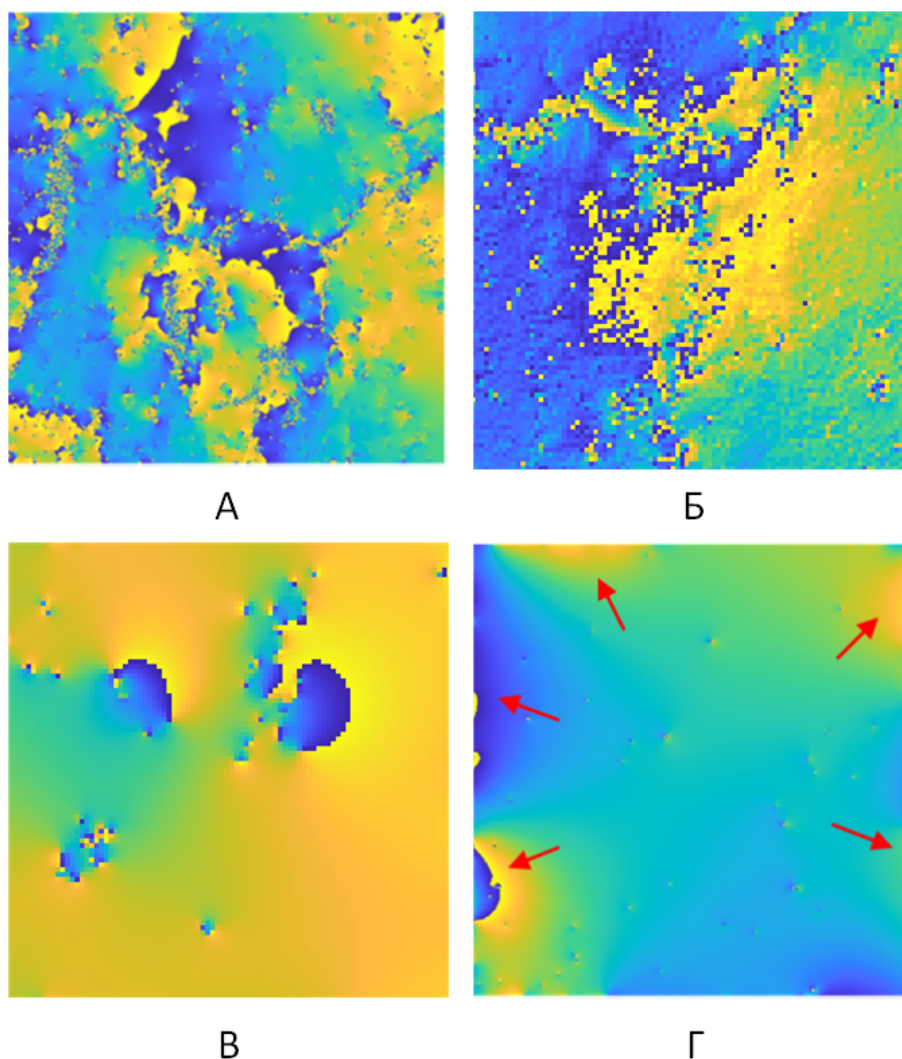


Рис. 2.6: Дефекты встречного вихревого поля фазы: А) лишние интерференционные полосы и низкочастотные флуктуации, Б) «бахрома», В) «лунки», Г) краевые эффекты

проводятся рекурсивно по правилам (2.17)-(2.19). Получаемое в результате применения рекурсивной обработки встречное вихревое поле фазы:

$$\dot{C}(z) = \dot{C}_{I-Rc}(z)\dot{C}_{II-Rc}(z)\dots\dot{C}_{N-Rc}(z) \quad (2.20)$$

имеет заметно меньший уровень низкочастотных флуктуаций (рис. 2.7-Б), чем при прямой обработке по правилам (2.12)-(2.14), в том числе многократной с повторным развёртыванием остаточных интерферограмм [143], что приводит к меньшим ошибкам при восстановлении конгруэнтности абсолютной фазы.

Рекурсивное выравнивание встречного вихревого поля фазы препятствует накоплению флуктуаций поля и позволяет их подавлять на всех этапах его построения. Доказа-

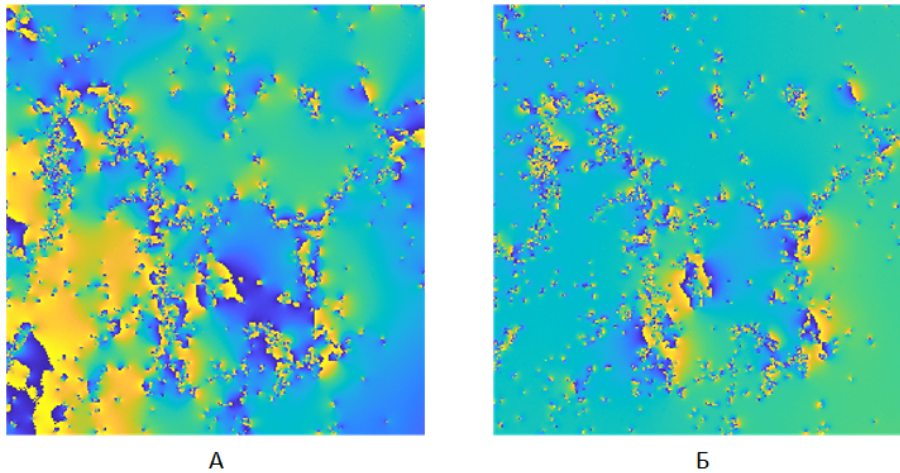


Рис. 2.7: Встречное вихревое поле интерферограммы ALOS PALSAR: А) с повторным развёртыванием остаточной интерферограммы по правилам (2.14)-2.16 , Б) с рекурсивным выравниванием

тельность сходимости метода не входит в рамки данной работы и в рамки научной специальности, однако далее при развёртывании тестовых примеров и интерферограмм радиолокационных систем ДЗЗ (раздел 2.4) установлено, что процесс построения не заклинивается, а количество вновь образующихся разрывов убывает экспоненциально как при рекурсивном спуске, так и при переходе к следующей итерации.

### **Зеркалирование интерферограммы**

Для подавления краевого эффекта при формировании встречного вихревого поля непарные разрывы можно дополнить до фазового диполя путём добавления элементарного вихря противоположного знака на границе или за границей кадра. Однако, поскольку в предложенном выше методе все точки разрыва рассматриваются как независимые друг от друга, то выделение среди них непарных становится невозможным. Таким образом, целесообразно дополнить интерферограмму за границей кадра так, чтобы у каждой точки разрыва гарантированно имелась парная точка противоположного знака, что можно реализовать с помощью зеркального дополнения интерферограммы отражениями её частей способом, изображённым на рис. 2.8-А. При таком дополнении следы непарных разрывов фазы после развёртывания перемещаются к краям новой интерферограммы, а вблизи границ исходной интерферограммы встречное вихревое поля фазы образует меньше изгибов и меньше флуктуирует (рис. 2.8-Б,В).

Следует отметить, что при зеркальном дополнении интерферограммы количество точек разрыва увеличивается в 4 раза, соответствующим образом увеличивается и количество вычислительных операций при построении встречного вихревого поля дополненной



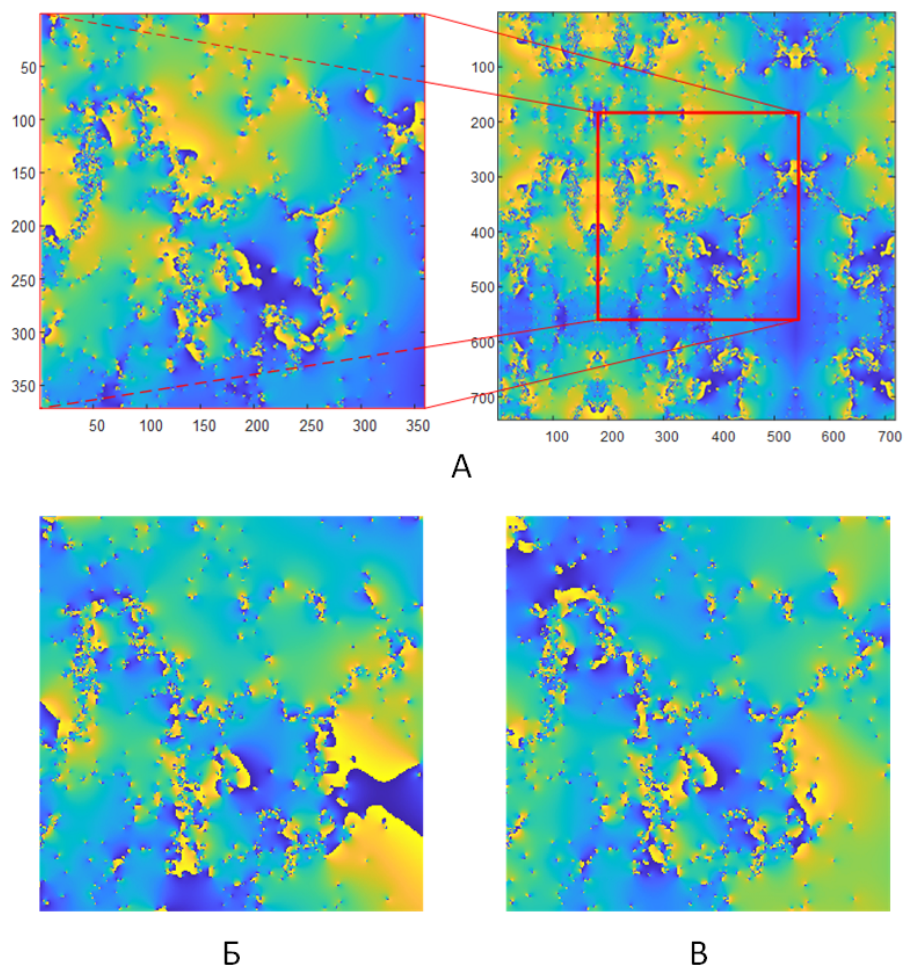


Рис. 2.8: Зеркальное дополнение интерферограмм

интерферограммы. Однако необходимости построения встречного вихревого поля за границами исходной интерферограммы нет (в противном случае количество вычислительных операций увеличилось бы в 16 раз).

#### **Низкочастотная пост-фильтрация с адаптивно подстраиваемой частотой среза АЧХ фильтра**

Для подавления эффектов «бахромы» и «лунок» предлагается вновь использовать пост-фильтрацию полученной остаточной интерферограммы с выделением из неё безразрывной низкочастотной составляющей с максимально возможной верхней граничной частотой спектра. Для этого вновь используется низкочастотный гауссовый фильтр с адаптивно подстраиваемой частотой среза АЧХ. Подстройка частоты осуществляется так, чтобы найти максимальную частоту, при которой функция вычетов сглаженной этим фильтром остаточной интерферограммы  $I_\delta(z)$  остаётся равной нулю. Результат применения фильтрации представлен на рис. 2.9, и из него видно, что после нескольких её циклов ин-

терференционные полосы спрямляются и укорачиваются, а остаточная фаза становится почти всюду равной нулю. Алгоритм перебора частоты рассмотрен далее в разделе 2.4.

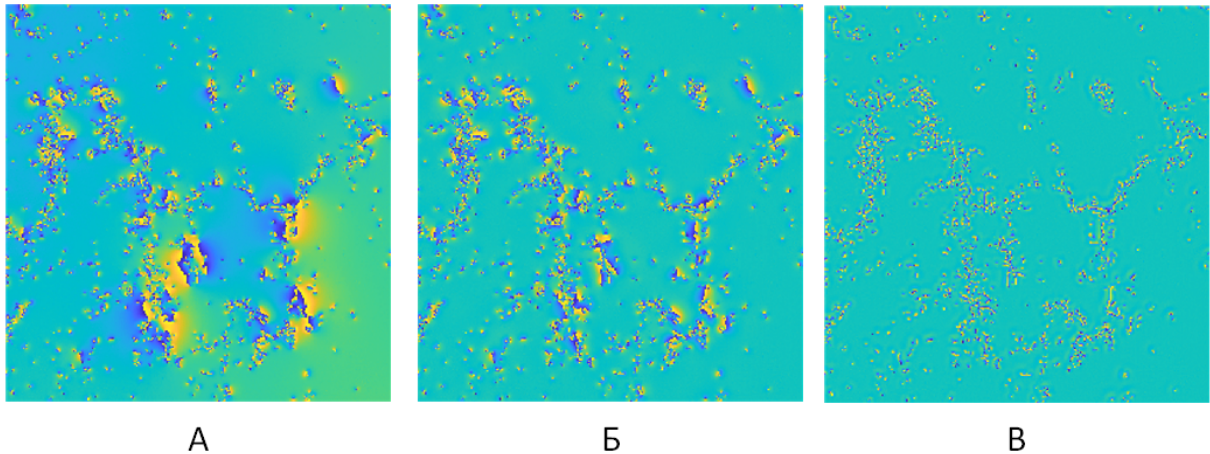


Рис. 2.9: Влияние пост-фильтрации на вид остаточной интерферограммы  $I_\delta(z)$ : А) интерферограмма перед фильтрацией, Б) интерферограмма после трёх циклов фильтрации, В) интерферограмма после десяти циклов фильтрации

### 2.3 Алгоритмы, реализующие предложенный метод

Разработанный рекурсивный алгоритм, реализующий метод выравнивания встречного вихревого поля фазы (алгоритм ВВПФ), реализуется с помощью трёх подчинённых алгоритмов: алгоритма `unwarp3` (реализует расчёт по выражению (2.12)), рекурсивного алгоритма `unwarp4` (реализует расчёт по выражениям (2.17)-(2.19)) и алгоритма низкой частотной гауссовой пост-фильтрации с адаптивно подстраиваемой частотой среза АЧХ фильтра — `adapt_gauss`.

#### I. Алгоритм расчёта встречного вихревого поля фазы в рамках одной итерации — `unwarp3`

Алгоритм осуществляет расчёт встречного вихревого поля фазы интерферограммы в рамках одной итерации, для чего вычисляется функция вычетов, по которой локализуются точки разрыва фазы (с учётом их знака и порядка), и далее для каждой точки формируется элементарный вихрь противоположного знака  $J(z)$  с центром в этой точке. Далее элементарные вихри от всех точек разрыва суммируются, и результат суммирования приводится к комплексной форме.

ШАГИ алгоритма:

0. Инициализация встречного вихревого поля  $C(z)$  нулевым массивом размером действительных чисел, равным размеру интерферограммы ( $M_I \times N_I$ ).

1. Вычисление элементарного вихря  $J(z) = \arg\{z\}$  на поле размером  $2M_I \times 2N_I$ .

2. Вычисление зеркалированной копии интерферограммы  $I(z) \rightarrow I_m(z)$  и построение функции её вычетов —  $Q_m(z)$ . Определение количества точек разрыва  $\mu + \nu$ , их координат  $z_{(0/p)i}$  и их весов  $q_{(0/p)i}$ . Если количество точек разрыва равно нулю, то переход к шагу 6.

3. Для  $i$ -й точки разрыва производится считывание фрагмента элементарного вихря размером  $M_I \times N_I$  с центром в точке с координатами  $z_{(0/p)i}$ .

4. Умножение всех элементов фрагмента элементарного вихря на вес разрыва  $q_{(0/p)i}$  и далее — прибавление фрагмента корректирующего вихря к встречному вихревому полю  $C(z)$ , если  $q < 0$ , или вычитание, если  $q > 0$ .

5. Если  $i$  меньше  $\mu + \nu$ , то переход к следующей точке  $i + 1$  и возврат к п. 3, иначе — переход к п 6.

6. Преобразование полученного поля к комплексной форме:  $C(z) \rightarrow \dot{C}(z) = \exp\{j \cdot C(z)\}$ , возврат  $\dot{C}(z)$  и завершение работы.

Операции построения корректирующего вихря удвоенного размера (п. 1) и замена комплексного умножения сложением фаз (пп. 4, 6) направлены на повышение быстродействия алгоритма, позволяя избегать многократных вычислений функции арктангенса и произведений комплексных чисел.

## II. Рекурсивный алгоритм развёртывания — unwrap4

Алгоритм осуществляет построение безразрывной абсолютной фазы, минимизируя при этом флуктуации встречного вихревого поля путём выделения с помощью фильтра и подавления (путём вычитания с сохранением интервала однозначности фазы) низкочастотной составляющей встречного вихревого поля. После каждого рекурсивного перехода частота среза АЧХ фильтра уменьшается, позволяя выделять и подавлять низкочастотные составляющие поля. Итерации и рекурсивные переходы алгоритма продолжаются до тех пор, пока не будет получена безразрывная относительная фаза (в соответствии с выражением (2.13)).

ШАГИ алгоритма:

0. Инициализация параметров: начальная частота среза АЧХ гауссового фильтра  $F_S$ , коэффициент понижения частоты  $N_f = 4$ ; считывание интерферограммы  $I(z)$ .

1. Вычисление количества точек разрыва  $\mu + \nu$ .

2. Если  $\mu + \nu = 0$ , то переход к п. 8; иначе — вызов алгоритма `unwgr3` и получение встречного вихревого поля  $\dot{C}(z)$ .

3. Вычисление новой частоты среза АЧХ гауссового фильтра  $F_S \leftarrow F_S/N_f$ .

4. Фильтрация поля  $\dot{C}(z)$  и получение сглаженного встречного вихревого поля  $\dot{E}(z)$ :  $\dot{E}(z) = \Omega_\gamma\{C(z)\}$ .

5. Вычисление количества точек разрыва сглаженного встречного вихревого поля  $\mu_E + \nu_E$ .

6. Если  $\mu_E + \nu_E = 0$ , то принять встречное вихревое поле  $\dot{C}(z)$  равным сглаженному  $\dot{E}(z)$ , иначе произвести расчёт встречного вихревого поля с помощью этого же алгоритма (`unwgr4`), вернувшись к шагу 0 с входными аргументами  $F_S$  и  $\dot{I}(z) = E(z)$ .

7. Выравнивание интерферограммы с помощью встречного вихревого поля  $\dot{C}(z)$  и сглаженного встречного вихревого поля  $\dot{E}(z)$ :  $\dot{I}(z) \leftarrow \dot{I}(z) \cdot \dot{E}(z)/\dot{C}(z)$ .

8. Возврат  $\dot{I}(z)$  и завершение работы.

В качестве начального значения для частоты среза АЧХ фильтра принимается  $F_S = \max\{M_I, N_I\}$ .

Блок-схемы алгоритмов `unwgr3` и `unwgr4` приведены на рис. 2.10.

**III. Алгоритм пост-фильтрации остаточной интерферограммы** — `adapt_gauss` включает следующие ШАГИ:

0. Инициализация минимальной ( $F_{min,old} = 0.01$ ) частоты и рабочей  $F_i = \min[M_I/2, N_I/2]$  частот среза АЧХ фильтра. Считывание интерферограммы  $\dot{I}(z)$  и её зеркалирование. Инициализация количества шагов работы фильтра (8 шагов).

1. Фильтрация  $\dot{I}(z)$  гауссовым фильтром в частотной области (1.21) с использованием БПФ и с частотой  $F_i$ . Получение сглаженной остаточной интерферограммы  $\dot{E}(z)$ .

2. Вычисление функции вычетов для  $\dot{E}(z)$ . Если количество точек разрыва на интерферограмме оказывается равным нулю, то  $F_{min,old} = F_i$ , иначе —  $F_{i,old} = F_i$ .

3. Вычисление новой рабочей частоты как среднего геометрического между  $F_{min,old}$  и  $F_{i,old}$ :  $F_i = \sqrt{F_{min,old} \cdot F_{i,old}}$ .

4. Если не пройдено заданное количество итераций, то возврат к п. 1, иначе — к п. 5.

5. Фильтрация  $\dot{I}(z)$  при частоте  $F_{i,old}$ .

6. Возврат  $\dot{I}(z)/\dot{E}(z)$  и завершение работы.

### **Вычислительная сложность алгоритма развёртывания**

Вычислительные сложности предложенных алгоритмов определяются как размера-

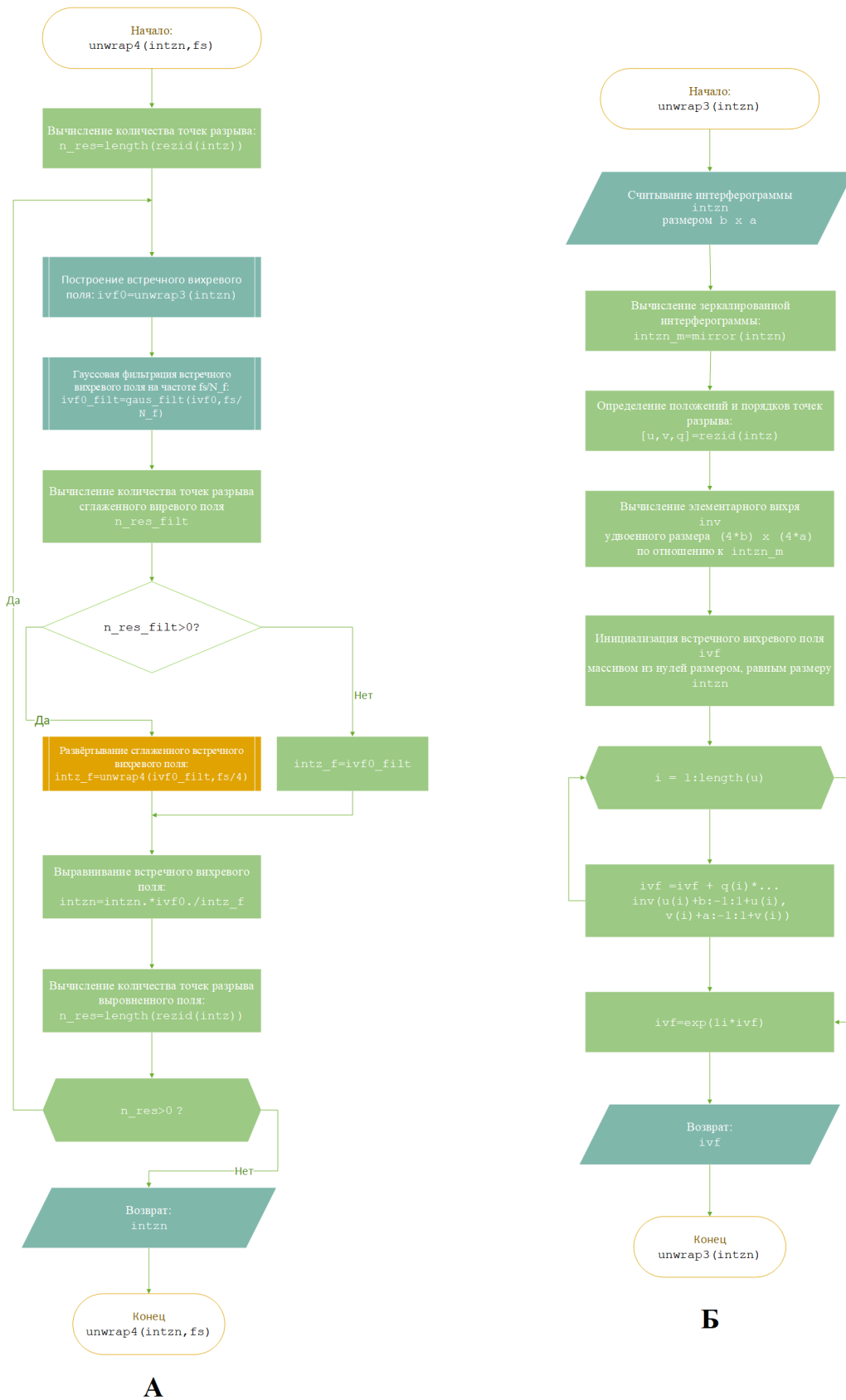


Рис. 2.10: Блок-схемы алгоритмов развёртывания unwarp4 (А) и unwarp3 (Б)

ми интерферограмм, так и количеством точек разрыва фазы на них. Так, алгоритм `unwgar3` требует выполнения  $M_I \times N_I \times (\mu + \nu)$  операций сложения и объема памяти размером  $4M_I N_I$  для хранения элементарного вихря  $J(z)$ . Вычисление элементарного вихря производится с использованием функции арктангенса (`atan2()`), которая применяется однократно и мало влияет на время работы алгоритма. Алгоритм `unwgar4` содержит операцию линейной фильтрации, реализуемой с использованием БПФ, вычислительная сложность которой не зависит от количества точек разрыва фазы и определяется как  $O(M_I N_I \times \log M_I N_I)$ , и операции по вызову алгоритма `unwgar3` и самого себя. Как будет показано далее, количество обрабатываемых точек разрыва при повторных вызовах алгоритмов уменьшается экспоненциально (в среднем), и, таким образом, время работы алгоритма можно принять как  $O(M_I \times N_I \times (\mu + \nu))$ . Экспериментальное исследование быстродействия алгоритма при обработке интерферограмм космических РСА производится в разделе 2.4 (пункт Г) настоящей работы.

### **Реализация на параллельных вычислительных устройствах**

Алгоритм `unwgar3` может быть реализован на параллельных вычислительных устройствах, поскольку операции построения элементарных вихрей для отдельных точек разрыва производятся независимо друг от друга, при этом обход точек разрыва может производиться в произвольном порядке. Для обработки интерферограмм большого размера автором предложена [146] блочная реализация алгоритма, заключающаяся в разбиении интерферограммы на блоки небольших размеров, построении встречного вихревого поля отдельно и независимо для каждого блока, что реализуется следующим образом:

1. Вся интерферограмма разбивается на блоки  $B_i$  небольшого размера (1-2 тысячи элементов по каждой стороне блока).
2. В каждом  $i$ -м блоке ( $B_i$ ) производится вычисление функции вычетов (1.30) и определение координат точек разрыва  $(m_{ik}, n_{ik})$  (рис. 2.11).
3. В каждом  $j$ -м блоке  $B_j$  (включая случаи, когда  $i = j$ ) производится вычисление фрагмента элементарного вихря  $J^*(z)$  размера  $2M^* \times 2N^*$ , точка разрыва которого расположена в верхнем левом углу  $i$ -го блока, а границы охватывают  $j$ -й блок. При вычислении встречного вихревого поля в  $j$ -м блоке от точки разрыва  $k$  с координатами  $(m_{ik}, n_{ik})$ , лежащей в  $i$ -м блоке, производится считывание фрагмента элементарного вихря  $J^*(z)$  размером  $M^* \times N^*$ , сдвинутого на  $(m_{ik}, n_{ik})$  относительно верхнего левого угла. Содержимое считанного фрагмента прибавляется к ранее вычисленному встречному вихревому полю.

4. Шаг 3 повторяется до тех пор, пока не будут пройдены все точки разрыва в блоке  $B_i$ .
5. Шаги 3–4 повторяются до тех пор, пока не будут обработаны все пары блоков  $B_i - B_j$ .
6. Производится соединение встречных вихревых полей, вычисленных во всех блоках, и преобразование полученного поля к комплексной форме.

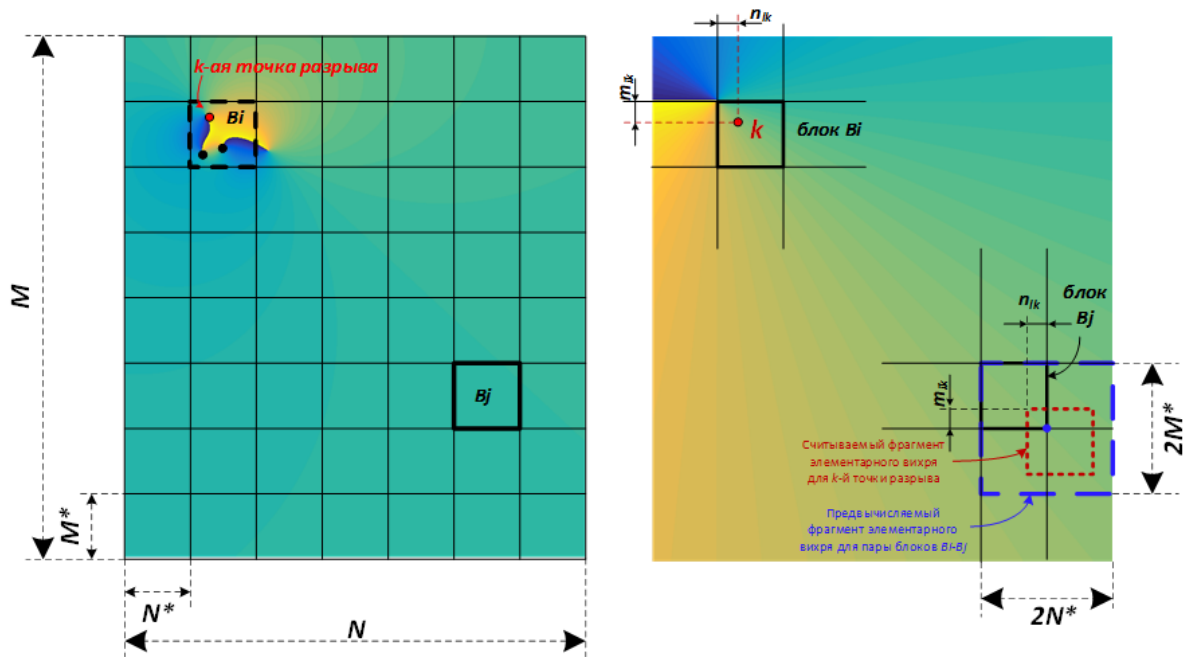


Рис. 2.11: Вычисление встречного вихревого поля фазы при блочной реализации алгоритма развёртывания: А) разбиение интерферограммы; Б) элементарный вихрь для блока  $B_i$  и расчёт фрагмента встречного вихревого поля от точки разрыва  $k$  в блоке  $B_j$

Блочная реализация не использует приближений, позволяя получить тот же результат построения встречного вихревого поля, что и исходный алгоритм `unwgr4`. Она снижает требования к объёму памяти вычислительных устройств, поскольку размер элементарного вихря при её использовании становится равным  $2M^* \times 2N^*$  (учетверённый размер блока). Быстродействие параллельной реализации алгоритма пропорционально квадрату количества блоков интерферограммы.

## 2.4 Оценка точности восстановления абсолютной фазы предложенным методом

Для исследования точности восстановления фазы алгоритмами развёртывания можно использовать ряд представленных далее моделей тестовых интерферограмм, содержащих разрывы разных типов и моделирующих типичные особенности поведения интер-

ферометрической фазы. При экспериментальном оценивании результатов интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ целесообразно применять методику, предлагаемую далее в разделе 3.3 настоящей работы, и в таком случае эталонная абсолютная фаза будет представлять собой набор (массив) значений фаз  $\Psi_{0i}$ , рассчитанных с использованием метода преобразования эталонных высот. При оценивании же точности развёртывания тестовых интерферограмм целесообразно использовать эталонные абсолютные фазы в виде двумерных (решётчатых) функций  $\Psi_{0,m,n}$ , вычисляемых при формировании тестовой интерферограммы. В качестве показателя точности развёртывания фазы тестовых интерферограмм целесообразно рассматривать с.к.о. ошибки восстановления фазы:

$$\sigma_{\Psi} = \sqrt{\frac{1}{M_T \cdot N_T - 1} \sum_{m=1}^{M_T} \sum_{n=1}^{N_T} (\hat{\Psi}_{m,n} - \Psi_{0,m,n})^2}, \quad (2.21)$$

где  $M_T, N_T$  — размеры тестовой интерферограммы,  $\hat{\Psi}_{m,n}$  — восстановленная абсолютная фаза тестовой интерферограммы.

Эксперимент по оцениванию точности для каждой модели и каждого алгоритма включает следующие этапы:

- формирование тестовой абсолютной фазы  $\Psi_{0,m,n}$ ;
- формирование тестовой интерферограммы:

$$\Delta\varphi_{m,n} = W \{ \Psi_{0,m,n} \}; \quad (2.22)$$

- развёртывание фазы тестовой интерферограммы, получение восстановленной тестовой абсолютной фазы  $\hat{\Psi}_{m,n}$ ;
- расчёт ошибки восстановления  $\sigma_{\Psi}$  по формуле (2.21).

Помимо предложенного в разделе алгоритма развёртывания фазы, исследовались следующие алгоритмы:

- алгоритм простого развёртывания по правилу (1.29);
- алгоритм растущих регионов (Region Growing, реализация в SARscape);
- алгоритм минимальной стоимости потока (MCF/SNAPHU, реализация в SARscape).

**А. Модель «озеро»** — плоская поверхность без разрывов фазы, имеющая в центре связный участок с полной декорреляцией эхо-сигналов (рис. 2.12-а). Модель описывается следующим образом:



$$\Psi_{0,m,n} = \begin{cases} W_{m,n}, & (m,n) \notin D \\ 0, & (m,n) \in D, \end{cases} \quad (2.23)$$

где  $W_{m,n}$  — дискретный гауссовый белый шум,  $D$  — круглая область радиуса  $R_D$ , соответствующая полной декорреляции эхо-сигналов. Данная модель описывает типичный случай возникновения разрывов I типа, а также разрывов II типа с короткими линиями разрыва. Она позволяет оценивать эффективность алгоритмов развёртывания при наличии на интерферограмме областей декорреляции эхо-сигналов, вызванных такими элементами местности, как водные поверхности (в любом диапазоне длин волн) и лесные поверхности в С- и Х-диапазонах.

При оценивании результатов обработки вычисление с.к.о. производится по формуле (2.21), применяемой к области, расположенной вне  $D$ .

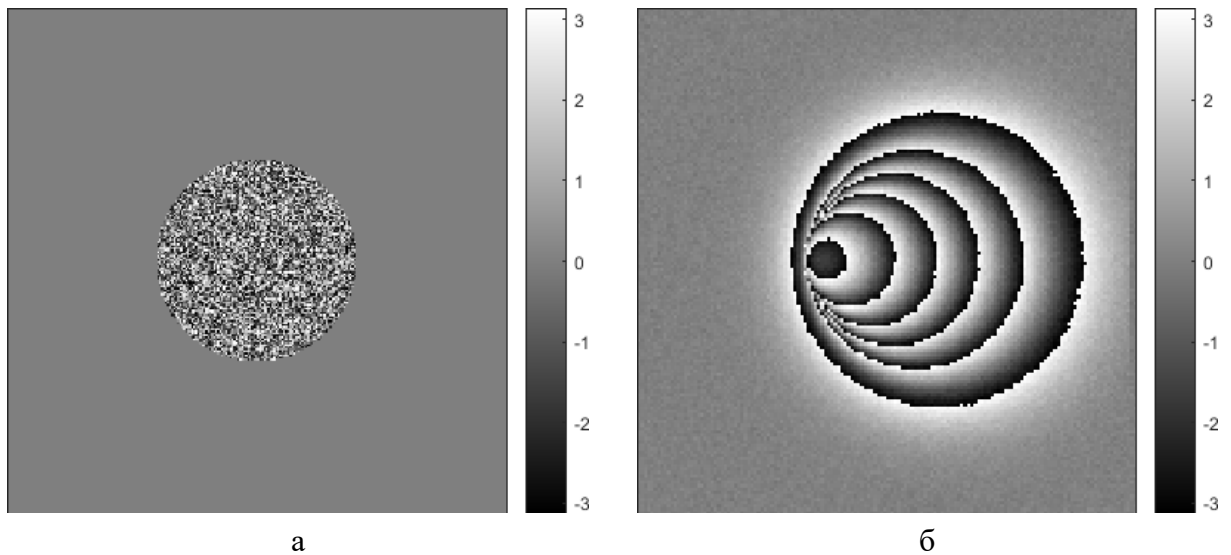


Рис. 2.12: Модель «озеро» (а); модель «гауссов холм» (б)

Результаты экспериментов представлены в табл. 2.1 и на рис. 2.4.

Таблица 2.1: Результаты эксперимента А: ошибки абсолютной фазы  $\sigma_\Psi$  для модели «озеро» с разными параметрами

Алгоритм	$500 \times 500,$ $R_D = 100$	$1000 \times 1000,$ $R_D = 300$	$1500 \times 1500,$ $R_D = 600$
	$\sigma_\Psi, \text{ рад}$		
Простое развёртывание	2,5	3,9	4,3
Region Growing	2,1	3,2	4,1
MCF	0	0	2,7
ВВПФ	0	0	0

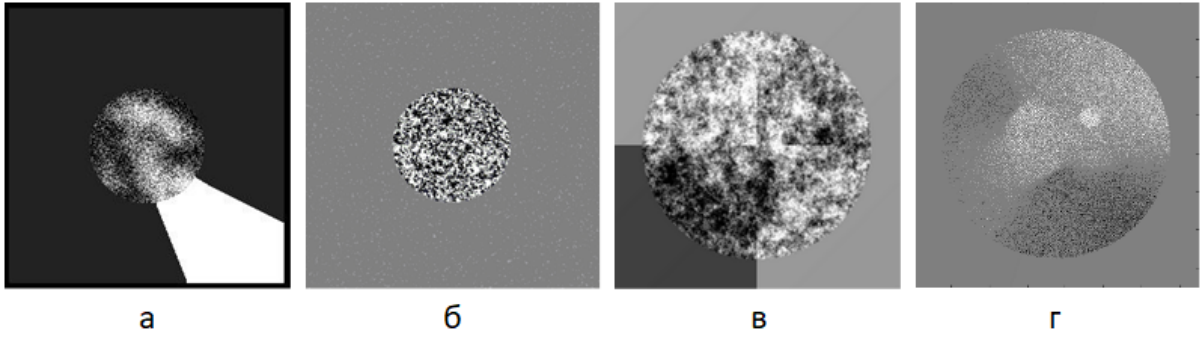


Рис. 2.13: Восстановленные абсолютные фазы тестовых интерферограмм модели «озеро»: алгоритм Region Growing,  $M_I \times N_I = 500 \times 500$ ,  $R_D = 100$  (а); алгоритм MCF,  $M_I \times N_I = 1000 \times 1000$ ,  $R_D = 100$  (б); алгоритм MCF,  $M_I \times N_I = 1500 \times 1500$ ,  $R_D = 600$  (в); алгоритм ВВПФ,  $M_I \times N_I = 1500 \times 1500$ ,  $R_D = 600$  (г)

По итогам проведения эксперимента с данной моделью можно отметить, что она корректно обрабатывается только двумя алгоритмами – предложенным и алгоритмом MCF. Два других алгоритма порождают ошибку развёртывания, а при большом размере области полной декорреляции возникает ошибка и при развёртывании алгоритмом MCF.

**Б. Модель «гауссов холм»** — модель возвышенности с крутым уклоном (превосходящим угол бокового обзора РСА), в равнодальностной проекции (с «завалом» в направлении съёмки). В качестве исходной модели рельефа используется двумерная гауссовая функция:

$$H_B(m', n') = H_{II} \exp \left\{ -\frac{m'^2 + n'^2}{2\varepsilon^2} \right\}, \quad (2.24)$$

где  $H_{II}$  и  $\varepsilon$  — высота и коэффициент ширины холма. Формирование соответствующей рельефу интерферограммы осуществляется преобразованием высот и координат:

$$\begin{aligned} \Psi_{0,m,n} &= \frac{4\pi}{\lambda} \cdot [R_1(m', n') - R_2(m', n')], \\ R_{1,2}(m', n') &= \sqrt{(H_{1,2}^0 - H(m', n'))^2 + (X_{1,2} + n')^2}, \\ m &= m', \\ n &= \frac{R_1(m', n') - R_0}{c \cdot t_{s1}}, \\ \Delta\varphi_{m,n} &= W \{ \Psi_{0,m,n} \}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

где  $R_1(k, l)$  и  $R_2(k, l)$  — наклонные дальности от фазового центра антенны РСА до соответствующего элемента модели (для первого и второго пролёта, соответственно);  $H_{1,2}^0$  — высоты (приведённые к геометрии плоской Земли) орбиты РСА относительно плоскости модели;  $X_{1,2}$  — наземные дальности (приведённые к геометрии плоской Земли) от

подспутниковой точки до ближайшего края сцены. Данная модель позволяет оценивать эффективность алгоритмов развёртывания при наличии на интерферограмме разрывов II типа.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 2.14 и в таблице 2.2. По итогам проведения эксперимента с данной моделью можно отметить, что алгоритмы Region Growing и простое развёртывание порождают заметные артефакты развёртывания, что приводит к существенному снижению точности результата. Алгоритм MCF для интерферограммы размером  $2500 \times 2500$  элементов порождает артефакты от блочного разбиения интерферограммы, в то время как для алгоритма ВВПФ артефакты развёртывания сконцентрированы только в окрестности областей разрыва фазы.

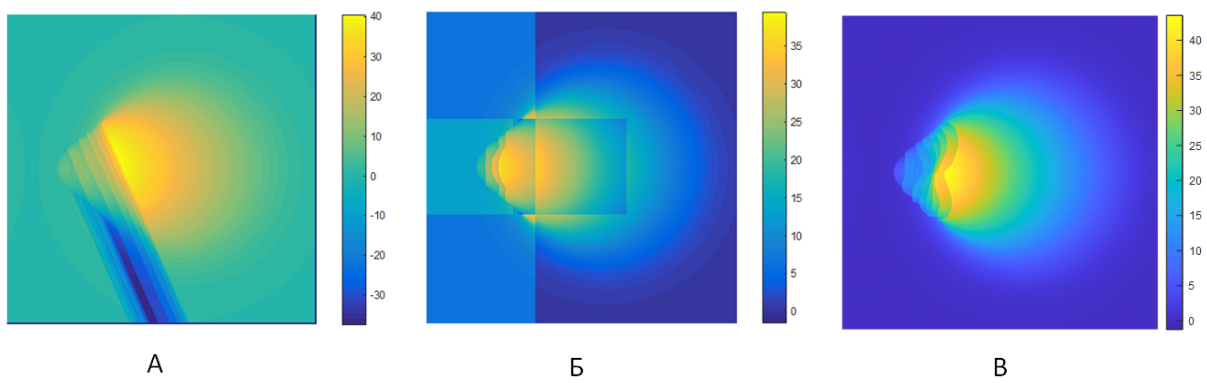


Рис. 2.14: Восстановленные абсолютные фазы тестовых интерферограмм модели «гауссов холм» ( $H_{1,2}^0 = X_1 = 700$  км,  $X_2 = 699,980$  км,  $\lambda = 5$  мм,  $H_{II} = 1000$  м,  $\varepsilon = 500$  м): алгоритм Region Growing (а); алгоритм MCF (б); алгоритм ВВПФ (в).

Таблица 2.2: Результаты эксперимента Б: ошибки абсолютной фазы  $\sigma_\psi$  для модели «гауссов холм» с разными параметрами

Алгоритм	$500 \times 500,$ $H_{II} = 130$ м, $\varepsilon = 100$ м	$2500 \times 2500,$ $H_{II} = 1000$ м, $\varepsilon = 500$ м
	$\sigma_\psi$ , рад	
Простое развёртывание	17,2	16,3
Region Growing	15,7	11,3
MCF	0,55	6,51
ВВПФ	0,80	4,67

**В. Модель «гора»** — возвышение с высоким уклоном, образующим разрыв III типа. В качестве исходного рельефа используется модель (2.8), «завал» в направлении съёмки не

учитывается. Абсолютная фаза и интерферограмма описываются следующим образом:

$$\Psi_{0,m,n} = H_{III} \cdot \exp\left(-\frac{|z|^2}{2A_{III}^2}\right), \quad (2.26)$$

$$\Delta\varphi_{m,n} = W\{\Psi_{0,m,n}\}.$$

Параметры  $H_{III}$  и  $A_{III}$  выбираются исходя из соотношения 2.9.

Результаты экспериментов представлены в табл. 2.3 и на рис. 2.15. По итогам проведения эксперимента с данной моделью можно отметить, что ни один алгоритм не восстанавливает абсолютную фазу безошибочно, алгоритм MCF демонстрирует наименьшую ошибку фазы, ВВПФ — сопоставимую.

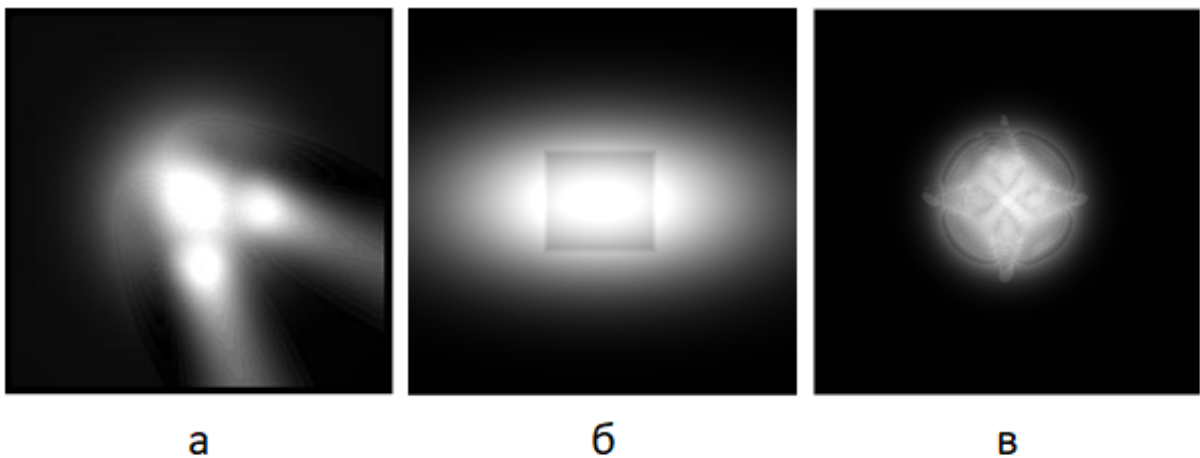


Рис. 2.15: Восстановленные абсолютные фазы тестовых интерферограмм модели «гора» ( $H_{III} = 200$  и  $A_{III} = 50$ ): алгоритм Region Growing (а); алгоритм MCF (б); алгоритм ВВПФ (в)

Таблица 2.3: Результаты эксперимента В: ошибки абсолютной фазы  $\sigma_\Psi$  для модели размером  $M_I \times N_I = 500 \times 500$  при  $H_{III} = 200$  м и  $A_{III} = 50$

Алгоритм	$\sigma_\Psi$ , рад
Простое развёртывание	16,9
Region Growing	16,1
MCF	10,3
ВВПФ	11,3

### Г. Интерферограмма PCA ALOS PALSAR.

Как уже отмечалось ранее (глава 1), оценивание точности восстановления абсолютной фазы реальных космических радиолокационных данных ДЗЗ потребует разработки методики, чему будет посвящена глава 3. Однако на данном этапе возможно осуществить сравнение результата развёртывания фазы предложенным алгоритмом с каким-либо другим

алгоритмом, используемым в качестве «эталонного» (далее в таком качестве используется алгоритм MCF), с помощью разностных карт восстановленных абсолютных фаз. Результат такого сравнения для одной из интерферограмм, полученных по радиолокационным данным PCA ALOS PALSAR, при разных значениях частоты фильтра фазового шума представлен на рис. 2.18. На рис. 2.18-г представлена разностная карта интерферограммы, полученной с использованием гауссового фильтра фазового шума с частотой среза 200 эл. (при размере кадра  $2225 \times 2150$  эл.): основной тон карты соответствует участкам совпадения значений восстановленных абсолютных фаз, тёмно-синий и тёмно-жёлтый тона — отклонениям восстановленных фаз на  $-2\pi$  и  $+2\pi$ , соответственно. По виду разностной карты можно заключить, что результаты восстановления фазы обоими алгоритмами практически идентичны, отличия наблюдаются, как правило, в областях с низкой корреляцией (озеро и водохранилище) и на обрывистых элементах рельефа. На рис. 2.18-д представлена разностная карта для той же интерферограммы, но обработанной фильтром фазового шума с частотой среза 170 эл.: в правом нижнем углу этой разностной карты возникает значительных участков различия фаз на  $+2\pi$ , который свидетельствует о появлении ошибки развёртывания одним из алгоритмов. Из того обстоятельства, что на разностной карте двух абсолютных фазы, полученных алгоритмом ВВПФ (при частотах фильтра 170 и 200 эл.) такой участок отсутствует, можно сделать вывод, что ошибка происходит именно при использовании алгоритма MCF.

По этой же интерферограмме (но без предварительной фильтрации фазового шума) была произведена оценка быстродействия разработанного алгоритма, включающая как общую оценку времени работы при различных размерах интерферограммы, так и трудоёмкость вычислений (оцениваемую по количеству обрабатываемых точек разрыва фазы) в рамках отдельных итераций и рекурсивных переходов. На рис. 2.16 представлены зависимости количества точек разрыва фазы  $\mu + \nu$  (с учётом зеркалирования интерферограммы) от номера итерации или рекурсивного перехода  $K_i$  при различных значениях коэффициента накопления интерферограммы. Также на графиках приведены значения общего времени обработки  $T_{obr}$  и относительного количества точек разрыва фазы, обрабатываемых в первой (самой трудоёмкой) итерации —  $q_{1,1}$ . Запуски алгоритма производились на персональном компьютере с процессором Intel Core i5, тактовая частота процессора — 2,67 ГГц (год выпуска процессора — 2009), объём ОЗУ персонального компьютера — 12 ГБ; среда разработки — MATLAB R2021a.

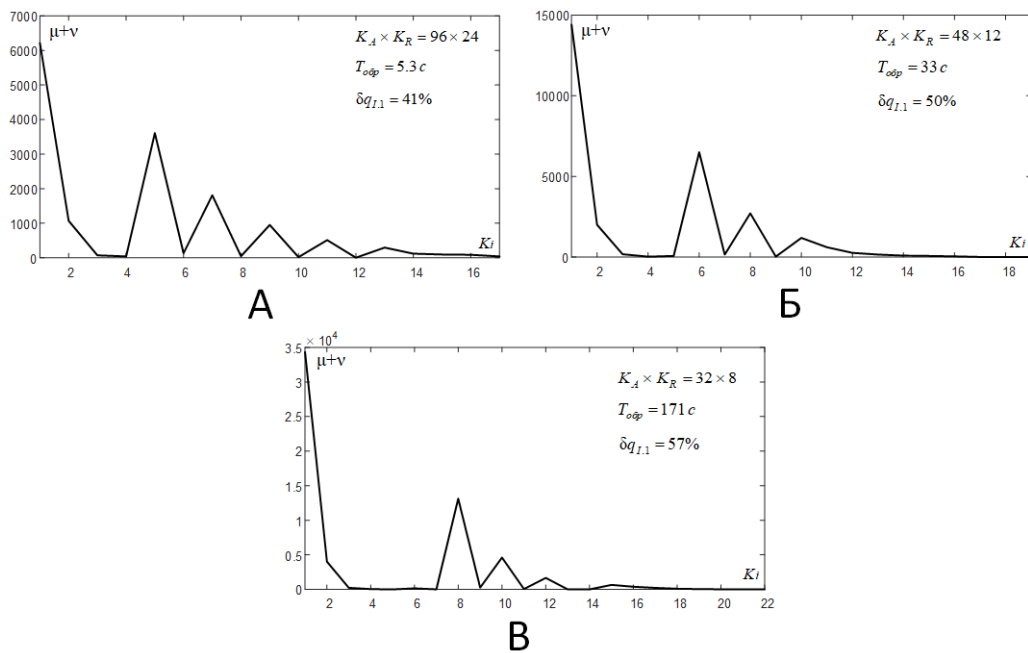


Рис. 2.16: Количества точек разрыва фазы  $\mu + \nu$ , обрабатываемых на каждой итерации и рекурсивном переходе при работе алгоритма: А) коэффициент накопления  $96 \times 24$ ; Б) коэффициент накопления  $48 \times 12$ ; В) коэффициент накопления  $32 \times 8$

Из графиков видно, количество обрабатываемых точек разрыва на каждом шаге (новой итерации или рекурсивном переходе) работы алгоритма немонотонно убывает, причём увеличение количества точек разрыва на следующем шаге относительно предыдущего соответствует моментам возврата из рекурсивно вызванной функции. В среднем убывание количества точек разрыва идёт по экспоненциальному закону, и это означает, что основная трудоёмкость вычислений сосредоточена в обработке самой первой итерации: для рассмотренных случаев в ней производится от 41 до 57% всех вычислительных операций по построению и выравниванию встречного вихревого поля, причём доля трудоёмкости ( $q_{I.1}$ ) растёт по мере увеличения размера интерферограммы. Вследствие этого, как видно из графика на рис. 2.17, общее время обработки интерферограмм почти линейно зависит от произведения количества элементов интерферограммы на количество разрывов фазы на ней. Изгиб в начале графика связан с повышением доли вычислительных затрат на проведение вспомогательных операций, в первую очередь — фильтрации интерферограммы с использованием БПФ, имеющего трудоёмкость  $O(M_I N_I \times \log M_I N_I)$ .

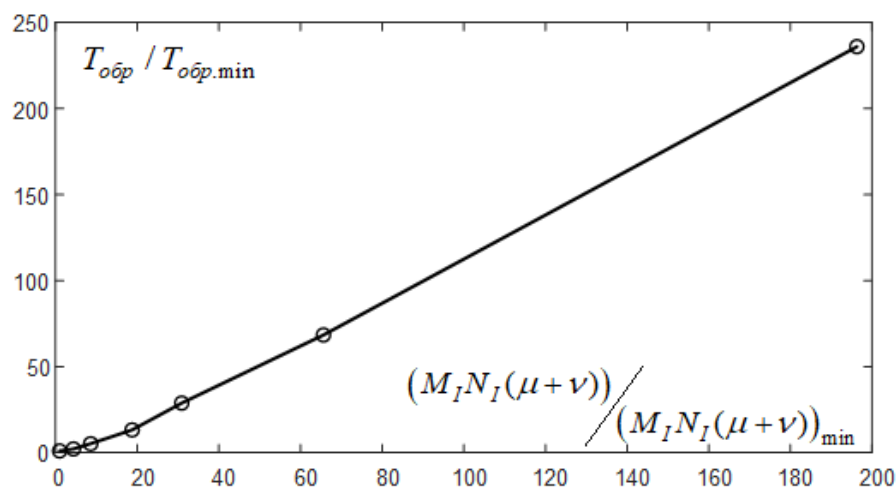


Рис. 2.17: Зависимость относительного времени работы алгоритма от размера данных (минимальный размер фрагмента —  $185 \times 179$  элементов)

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Предложена уточнённая модель интерферометрической фазы и её разрывов, основанная на комплекснозначном дискретном представлении интерферограммы. Типовые разрывы фазы, вызванные наложением радиолокационных эхо-сигналов, представляются в модели в виде комбинаций нулей и полюсов функций комплексной переменной, заданной на комплексной плоскости из координат элементов интерферограммы. В отличие от общепринятой модели, предложенная модель не использует амплитудную информацию комплексных радиолокационных изображений и позволяет без потери точности сократить объём используемых данных на некоторых этапах интерферометрической обработки (накоплении, оценивании когерентности, фильтрации фазового шума).

2. Предложен новый метод развёртывания фазы, заключающийся в построении и рекурсивном выравнивании встречного вихревого поля фазы перед вычислением абсолютной фазы. Метод основан на чередовании операций построения встречного вихревого поля фазы с использованием прямого устранения разрывов с помощью элементарных вихрей фазы, и его низкочастотной фильтрации для подавления низкочастотных флуктуаций и других дефектов поля. Результирующая абсолютная фаза формируется в виде суммы из произведения встречных вихревых полей, полученных на отдельных шагах алгоритма, реализующего метод, и остаточной интерферограммы. Получаемая в результате применения метода абсолютная фаза конгруэнтна фазе исходной интерферограммы.

3. Разработан алгоритм, реализующий метод развёртывания фазы (алгоритм ВВПФ).

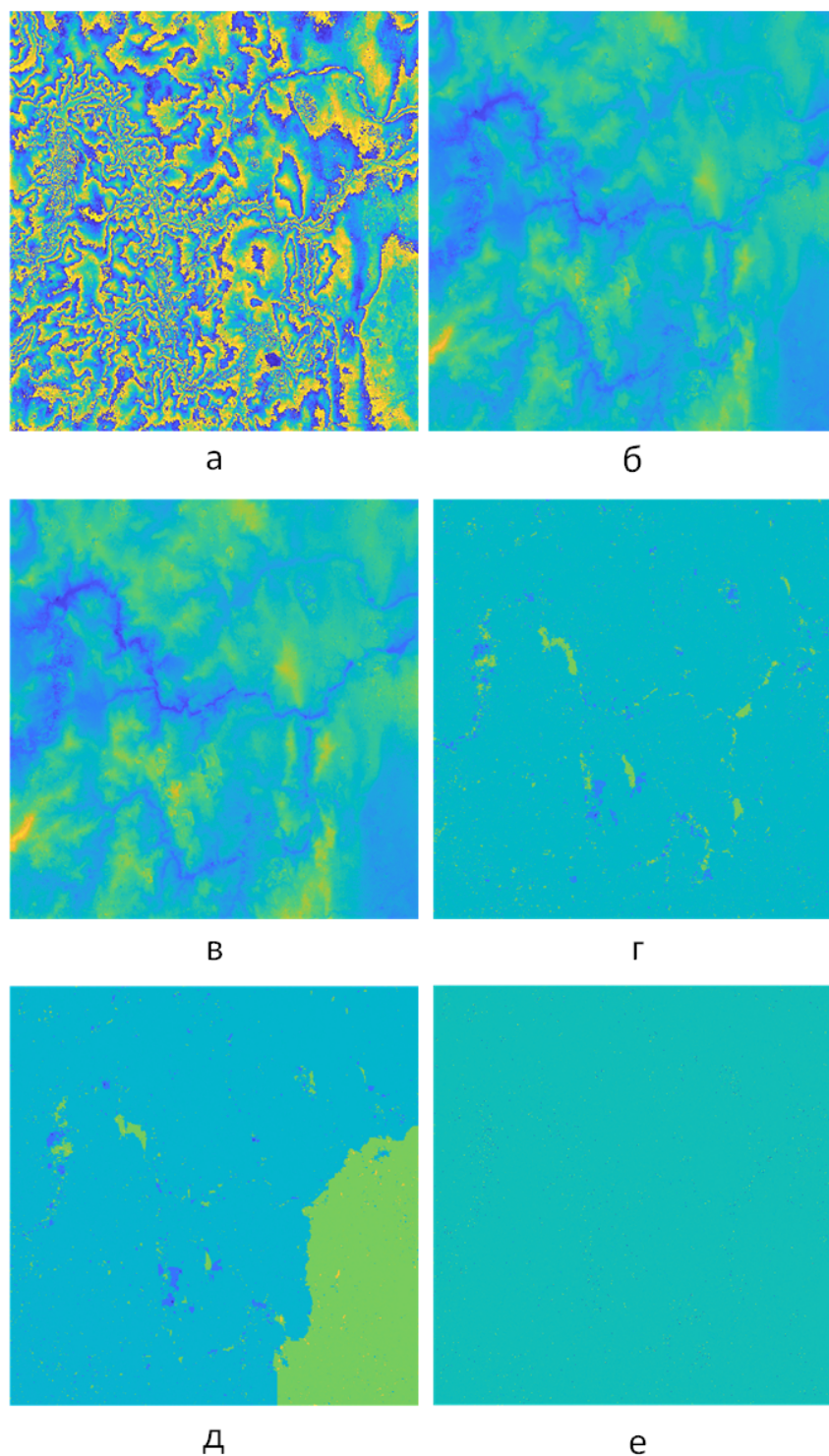


Рис. 2.18: Развёртывание интерферограммы КА ALOS PALSAR (а) с малой высотой неоднозначности для местности с холмистым рельефом (интерферограмма № 1): абсолютная фаза, восстановленная методом MCF (б); абсолютная фаза, восстановленная методом ВВПФ (в); разностные карты абсолютных фаз, восстановленных алгоритмами MCF (г) и ВВПФ (д); разностная карта абсолютных фаз, восстановленных алгоритмом ВВПФ при двух разных предварительных фильтрах фазового шума (е)



Показано, что вычислительная сложность предложенного алгоритма приближённо линейна и 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. Предложена модификация подалгоритма построения встречного вихревого, которая без потери точности может быть реализована на параллельных вычислительных устройствах.

4. С использованием тестовых интерферограмм, содержащих разрывы фазы разных типов, и интерферограмм земной поверхности, показано, что предложенный метод развёртывания позволяет получить точностью, сопоставимой или превышающей точность алгоритма минимальной стоимости потока, чаще всего применяемого для развёртывания фазы в программных комплексах интерферометрической обработки данных, особенно при обработке интерферограмм больших размеров.

## МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭТАПОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Предложен новый метод оценки точности абсолютной фазы интерферограмм, полученных при интерферометрической обработке радиолокационных данных, основанный на преобразовании эталонных высот в систему координат радиолокационных изображений и интерферограмм и совмещении эталонных и оцениваемых данных. На основе предложенного метода разработаны методики оценивания точности результатов отдельных этапов интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ.*

### **3.1 Проблемы интерпретации цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии. Требования к тестовому участку**

На основе проведённого в главе 1 анализа технологии интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ и источников возникновения ошибок получаемого результата можно выделить следующие основные проблемы при оценивании эффективности этапов интерферометрической обработки.

**1. Необходимость завершения интерферометрической обработки для возможности оценивания точности ЦМР.** Поскольку эталоном для оценивания точности результатов обработки являются высотные данные в географической системе координат, то значения показателей точности результата интерферометрической обработки — цифровой модели рельефа или карты смещений рельефа — можно получить только по завершении всей процедуры интерферометрической обработки и геопривязки абсолютной фазы. Таким образом, становится затруднена оценка точности результата основных её этапов — подавления фазового шума и развёртывания фазы, и, следовательно, решение задач о выборе наилучших алгоритмов и поиске оптимальных параметров обработки становится неэффективным.

**2. Неточное соответствие** карты высот, получаемой после геопривязки абсолютной фазы, понятиям цифровой модели рельефа (ЦМР) и цифровой модели поверхности (ЦМП). Восстановленная абсолютная фаза после её геопривязки наилучшим образом совпадает с цифровой моделью рельефа только на открытых участках земной поверхности с

преобладающей низкорослой растительностью (либо с полным её отсутствием) — степи, луга, пустыни, тундры и др. (рис.3.1). Такие поверхности занимают значительную часть поверхности суши, однако вне таких участков возникают следующие особенности:

— для лесных поверхностей имеет место объёмное рассеяние электромагнитных волн, которое влечёт за собой смещение оценки высоты в сторону её увеличения пропорционально высоте растительности [30], а также происходит увеличение шумовой составляющей фазы вплоть до полной декорреляции сигнала (последнее особенно выражено в РСА, работающих в X-диапазоне);

— для территорий с городской и промышленной застройкой при съёмке в разрешении более высоком, чем размер построек, карта высот не будет совпадать с ЦМР и ЦМП непосредственно в месте расположения строения, так и в некоторой области, прилегающей к нему как со стороны, ориентированной к траектории полёта РСА, — из-за эффектов сдвигки и наложения, так и с противоположной стороны — из-за эффекта затенения. Размеры этих областей будут определяться как высотой строения, так и углом падения антенного луча  $\theta_0$ . При съёмке в низком и среднем разрешении оценка высоты будет отклоняться от истинного значения на величину, определяемую средней высотой и плотностью застройки [30];

— на участках проведения интенсивных горных работ (добыча полезных ископаемых, промышленное строительство), как правило, возможно получение устойчивой интерференционной картины поверхности, однако она будет содержать значительную дифференциальную (сдвиговую) компоненту в выражении (1.15). Кроме того, топографическое нивелирование и мониторинг рельефа в таких районах производится не столько предприятиями картографо-геодезической отрасли, сколько геодезическими и маркшейдерскими службами предприятия-владельца. Поэтому данные цифровых топографических карт для таких территорий будут, как правило, неполными и устаревшими, а сами такие территории — малопригодными для оценивания точности;

— на участках, расположенных вдоль дорог, железных дорог и некоторых других инженерных коммуникаций карта высот будет включать в себя следы насыпей, выемок и других элементов верхнего строения пути, не являющихся элементами рельефа с точки зрения картографо-геодезических норм и правил;

— для водных поверхностей на интерференционных картинах имеет место полное отсутствие топографической составляющей абсолютной фазы и, таким образом, становится

невозможным какое-либо оценивание поверхности водного зеркала;

— при съёмке в зимний период следует учитывать, что снежный покров радиопрозрачен лишь частично [21], из-за чего значения оценок высоты также могут смещаться. При этом следует отметить повышение когерентности отражений от заснеженных поверхностей по сравнению с незаснеженными ввиду меньшей изменчивости подстилающей поверхности под покровом. Покрытые льдом водные поверхности обеспечивают среднекогерентное отражение эхо-сигналов, что также следует учесть при оценке точности восстановления абсолютной фазы.



Рис. 3.1: Различные представления поверхности: а) цифровая модель рельефа; б) цифровая модель поверхности

**3. Влияние погрешностей в измерении положения носителя РСА на результат обработки.** Поскольку координаты и скорости носителя РСА входят в выражения для вычисления параметров преобразования восстановленной абсолютной фазы в цифровую модель рельефа, то погрешности измерений этих параметров будут приводить, как отмечалось в разделе 1.3, к появлению существенных погрешностей результатов обработки. Для существенного снижения влияния погрешностей измерений положений носителя необходимо использовать наземные опорные точки с известными координатами и геодезическими высотами, по которым производится как географическая привязка ЦМР к местности, так и преобразование абсолютной фазы в высоты ЦМР [34, 91, 100]. Отсюда, методики оценивания эффективности этапов интерферометрической обработки также должны использовать наземные опорные контрольные (эталонные) точки вместо параметров положений носителя РСА и вычисляемых из них (с существенной погрешностью) параметров длины и уклона интерферометрической базы.

Источниками эталонных высотных данных (опорных и контрольных точек) для оценки точности абсолютных фаз и карт высот могут выступать матричные ЦМР, результаты GPS-измерений (GPS-треки), высотные данные цифровых топографических карт. К последним относятся координаты и высоты пунктов государственных геодезической (ГГС), гравиметрической (ГГрС) и нивелирной (ГНС) сетей, а также отметок высот, полученных

при топографическом нивелировании местности.

Матричная цифровая модель рельефа представляет собой двумерную функцию вида  $H_{ni}(x_i, y_i)$ , где  $x_i, y_i$  — координаты узлов равномерной сетки плоских прямоугольных координат заданных, как правило, в глобальных картографических проекциях (проекция Гаусса-Крюгера, глобальная поперечная проекция Меркатора UTM),  $H_{ni}$  — нормальные высоты, соответствующие узлам сетки. Распространены также и матричные модели, заданные географической системе координат «Широта — Долгота»:  $H_{ni}(B_i, L_i)$ , которая взаимно однозначно сопоставляется с предыдущей. Матричная ЦМР имеет максимально полный охват исследуемой сцены, однако её точность распределяется неравномерно, поскольку, как правило, для её построения используется интерполяция значений отметок высот. Это приводит не только к зависимости точности от используемого метода интерполяции, но и к существенным отклонениям на участках рельефа, подвергшихся антропогенным изменениям (карьеры, отвалы, насыпи, выемки грунта и др.). Кроме того, глобальные ЦМР со свободным доступом (SRTM, ALOS DSM, ASTER GDEM) имеют точность и шаг пространственной дискретизации, сопоставимые или худшие, нежели ожидаемая точность ЦМР, получаемых современными космическими радиолокационными средствами ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, что делает их малопригодными для обоснованного оценивания точности.

Остальные типы эталонных данных представляются в виде облаков точек, заданных в разных системах координат и высот. Пункты ГГС, ГГрС и ГНС представляются в виде точек  $\{X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}\}$  в геоцентрической системе координат. Результаты измерений глобальных навигационных систем представляются в виде точек в геоцентрической системе координат либо в виде тройки «Широта — Долгота — Геодезическая высота» —  $\{B_i, L_i, H_{0i}\}$ . Отметки высот, полученные при выполнении планово-высотного обоснования территорий, представляются виде троек «Широта — Долгота — Нормальная высота» —  $\{B_i, L_i, H_{0ni}\}$ . Для целей исследования эффективности нормальные высоты должны быть преобразованы в геодезические с использованием моделей геоида или квазигеоида в соответствии с картографо-геодезическими нормами [147].

Каждый из таких эталонов обладает определёнными достоинствами и недостатками при использовании в задаче оценивания точности. Пункты ГГС, ГГрС и ГНС имеют максимально точные координаты, однако их число в расчёте на радиолокационную сцену невелико, а на РЛИ со средней уверенностью дешифрируется только пункты ГГС. Эта-

лонные точки, полученные с использованием навигационных измерений, наоборот, могут легко опознаваться на местности (при соблюдении требований к проведению планово-высотного обоснования), однако получение таких точек весьма ресурсно- и трудозатратно с учётом необходимости их равномерного расположения по радиолокационной сцене. Отметки высот цифровых топографических карт (ЦТК), как правило, могут обеспечивать приемлемую плотность покрытия (от тысячи и более на сцену): их количество нормируется [148] и составляет от 8 до 20 штук на квадратный дециметр в масштабе ЦТК, что позволяет получать статистически обоснованные выводы о точности. Однако нормирование количества таких отметок приводит к тому, что они располагаются на произвольных элементах местности и, как правило, не могут быть дешифрованы на АРЛИ и интерферограмме. Это обстоятельство затрудняет определение и вычисление ошибки их планового (горизонтального) совмещения с картой высот, полученной при интерферометрической обработке. Основным же достоинством всех точечных эталонов является возможность использования атрибутивной информации для отбора точек, расположенных на разных типах отражающих поверхностей и отбраковки тех из них, что расположены на поверхностях с заведомо низкой или отсутствующей когерентностью отражений, а также для исследования точности карты высот для различных типов подстилающих поверхностей.

Таким образом, для исследования эффективности этапов интерферометрической обработки наиболее предпочтителен эталон высот в виде эталонных отметок высот топографических карт (далее — набор эталонных высот) как обеспечивающий наибольшую выборку и позволяющий исключать из рассмотрения участки сцены, непригодные для оценивания точности. Требования к точности самих отметок высот (плановой и вертикальной) для карт, изготовленных в Российской Федерации, устанавливаются руководствами по проведению нивелирных работ [129] исходя из величины периметра нивелирного полигона и допустимой среднеквадратичной ошибки в миллиметрах на километр длины нивелирного полигона. Так, точность отметок для нивелирования самого низкого — 4 класса — составляет от 8 см (для городской застройки) до 80 см (для малообжитых территорий) по критерию среднеквадратичной ошибки высот, что существенно превосходит возможности по построению ЦМР радиолокационными системами ДЗЗ высокого, а зачастую и сверхвысокого разрешения. Метод преобразования эталона высот в эталоны фазы для определения точности результатов подавления фазового шума и развёртывания фазы при интерферометрической обработке рассматривается в разделе 3.2 настоящей ра-

боты.

Тестовые участки для экспериментальной оценки точности ЦМР, получаемых при интерферометрической обработке, должны удовлетворять ряду требований для получения объективного результата [149]:

— картографическая обеспеченность участка: наличие в его пределах пунктов ГГС, ГГрС и ГНС, материалов топографических карт и планов различных масштабов, позволяющих сформировать наборы эталонных высот и наземных опорных точек для геопривязки КРЛИ и проведения оценивания точности измерения высот и фаз;

— наличие на участке выраженных форм рельефа, как естественных, так и искусственных (карьеры, отвалы, терриконы), для получения обоснованных оценок точности измерения высот — размах рельефа в пределах участка должен многократно превышать ожидаемые величины с.к.о. ошибки измерения рельефа;

— наличие объектов с различной отражательной способностью радиоволн и различными характеристиками когерентности эхо-сигналов: водные поверхности, лесная растительность, растительные покровы разных типов, открытые грунты, городская застройка — для возможности исследования влияния свойств поверхностей на точность измерения высот;

— наличие на участке хорошо опознаваемых точечных и линейных объектов для использования их (или их пересечений) в качестве наземных опорных точек: опоры линий электропередач, автомобильные и железные дороги, лесные просеки, отдельно стоящие здания и сооружения и участки городской застройки;

— желательны доступность и возможность полевых измерений.

В дальнейшем, при реализации методик оценки эффективности этапов интерферометрической обработки (глава 4) использовались тестовые участки, расположенные в местностях, удовлетворяющих указанным условиям.

### **3.2 Метод преобразования эталонных высот**

Предлагаемый метод преобразования эталонных высот заключается в преобразовании координат эталонных отметок высот в систему координат интерферограммы («Путевая дальность — Наклонная дальность»), вычисление параметров связи эталонных высот и соответствующих им абсолютных фаз развёрнутой интерферограммы с использовани-

ем метода наименьших квадратов (МНК), преобразования эталонных высот в эталонные абсолютные фазы (или абсолютных фаз интерферограммы в оценки высот ЦМР) и вычисление оценок среднеквадратичных отклонений высот ЦМР, абсолютных фаз или относительных фаз интерферограмм от их эталонных значений. Вычисления с.к.о. могут осуществляться как после этапов подавления фазового шума, так и после развёртывания фазы.

Восстановленная абсолютная фаза после этапа развёртывания представляет собой двумерный дискретный процесс (матрицу) вида  $\hat{\Psi}_{\tilde{m}, \tilde{n}}$ , где  $\tilde{m}$  — азимутальная координата,  $\tilde{n}$  — дальностная (обе — после накопления элементов интерферограммы). Набор эталонных высот представлен в виде облака точек в системе координат «Широта — Долгота — Нормальная высота» —  $\{B_i, L_i, H_{0ni}\}$ , распределённых по исследуемым сценам случайно, но с примерно одинаковой плотностью. Из-за того, что некоторые участки сцены непригодны или малопригодны для оценивания точности (водные поверхности, районы проведения горных работ и др.), в расположении отметок могут наблюдаться пустоты. Для обеспечения возможности оценивания точности карты высот, получаемой из восстановленной абсолютной фазы, а также самой абсолютной фазы, необходимо:

- привести (преобразовать) системы координат всех трёх наборов данных к единой системе координат;
- исключить систематическую ошибку преобразования координат, вызываемую неточностью измерения координат носителя РСА, с помощью наземных опорных точек (радиолокационных ориентиров);
- осуществить выборку из  $\hat{\Psi}_{\tilde{m}, \tilde{n}}$  тех значений фаз  $\{\hat{\Psi}_{\tilde{m}_i, \tilde{n}_i}\}$ , которые соответствуют положению эталонных высотных отметок;
- установить соответствие (найти параметры связи) между абсолютными фазами и высотами.

В работах, проанализированных в главе 1, оценки точности производились в геодезических системах координат, что влекло необходимость осуществлять геопривязку восстановленной абсолютной фазы и её преобразование в карту высот в геодезической системе координат. Поэтому для того, чтобы обеспечить возможность оценивания точности непосредственно после применения алгоритмов интерферометрической обработки целесообразно преобразовывать координаты эталонных высот  $\{B_i, L_i\}$  к системе координат восстановленной абсолютной фазы  $\{\tilde{m}_i, \tilde{n}_i\}$ , а радиолокационные ориентиры использовать для



исключения систематической ошибки этого преобразования.

Преобразование геоцентрических координат в систему координат КРЛИ при известной траектории движения фазового центра антенны РСА и известных координатах и высоте эталонной отметки основывается на уравнениях «Дальность — Доплер» (1.24) и в простейшем случае может быть описано следующим образом:

$$\begin{aligned} m_i &= \arg \min_j \left| \frac{\left( (\vec{R}_{P1j} - \vec{R}_{Ai}), (\vec{v}_{P1j} - \vec{v}_{Ai}) \right)}{\frac{\lambda}{2} |\vec{R}_{P1j} - \vec{R}_{Ai}|} - \Delta f_{1i} \right| + m_0 \\ n_i &= f_p \cdot \left( \frac{2R_{1i}}{c} - t_{\min} \right), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $i$  — номер эталонной отметки,  $j$  — номер шага вычисления,  $f_p$  — частота повторения зондирующих импульсов,  $t_{\min}$  — минимальное фиксируемое время задержки эхо-сигнала (для ближнего края кадра съёмки),  $m_0$  — начальный отсчёт полётной системе координат по путевой дальности,  $(\cdot, \cdot)$  — скалярное произведение. Вычисление  $m_i$  реализуется путём перебора с небольшим шагом различных возможных орбитальных положений ФЦА РСА  $\vec{R}_{P1j}$  в некоторой окрестности положения траверзы. Преобразование (3.1) (или аналогичные ему) реализовано в модулях «Map to Slant/Ground Conversion» программного комплекса SARscape, в модуле «Geocoding Processor» пакета PHOTOMOD Radar, которые могут быть использованы для реализации такого преобразования.

Для учёта накопления получаемые из (3.1) координаты  $\{m_i, n_i\}$  делятся на величины коэффициентов накопления:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_i &= m_i / c_A, \\ \tilde{n}_i &= n_i / c_R \end{aligned}, \quad (3.2)$$

Для устранения систематической ошибки преобразования координат наземных контрольных точек в систему «Путевая дальность — Наклонная дальность» используется аффинное преобразование координат радиолокационных ориентиров. Набор радиолокационных ориентиров также представляет собой точки в системе координат «Широта — Долгота»  $\{\dot{B}_i, \dot{L}_i, \dot{H}_{0i}\}$  количеством не менее трёх (желательно 5–10), распределённых так, чтобы охватывать углы сцены, её центральную часть, а также, по возможности, и края сцены. Параметры преобразования вычисляются на основании невязок положений радиолокационных ориентиров на АРЛИ с использованием метода наименьших квадратов. Имея координаты  $K_A$  радиолокационных ориентиров  $\{\dot{A}_{Xk}, \dot{A}_{Yk}\}$  (здесь и далее в главе 3 насто-

ящей работы точкой вверху будут координаты, относящиеся к радиолокационным ориентирам) в геодезической системе координат и преобразовав их с использованием 3.1 в систему координат КРЛИ-1  $\{\dot{m}_k, \dot{n}_k\}$  ( $k = \overline{1, K_A}, K_A \geq 3$ ), а также зная их истинные положения на АРЛИ-1  $\{\dot{m}_{A_k}, \dot{n}_{A_k}\}$ , можно составить матричные выражения:

$$\begin{pmatrix} \hat{\Lambda}_{mm} \\ \hat{\Lambda}_{mn} \\ \bar{\Lambda}_{0m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{m}_1 & \dot{n}_1 & 1 \\ \dot{m}_2 & \dot{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dot{m}_{K_A} & \dot{n}_{K_A} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \dot{m}_{A1} \\ \dot{m}_{A2} \\ \dots \\ \dot{m}_{A_{K_A}} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{\Lambda}_{nm} \\ \hat{\Lambda}_{nn} \\ \bar{\Lambda}_{0n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{m}_1 & \dot{n}_1 & 1 \\ \dot{m}_2 & \dot{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dot{m}_{K_A} & \dot{n}_{K_A} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \dot{n}_{A1} \\ \dot{n}_{A2} \\ \dots \\ \dot{n}_{A_{K_A}} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

где  $\Lambda_{mm}, \Lambda_{mn}, \Lambda_{nm}, \Lambda_{nn}$  — коэффициенты аффинного преобразования, отвечающие за поворот,  $\bar{\Lambda}_{0m}, \bar{\Lambda}_{0n}$  — коэффициенты, отвечающие за перенос. При хорошей обусловленности систем (3.3)–(3.4) должны выполняться приближённые равенства:  $\Lambda_{mm} \approx \Lambda_{mm}$ ,  $\Lambda_{mn} \approx -\Lambda_{nm}$ ,  $\Lambda_{nn} \approx \sqrt{1 - \Lambda_{mm}^2}$ .

С использованием найденных параметров далее осуществляется преобразование аффинное координат эталонных высотных отметок:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_i &= \Lambda_{mm}\tilde{m}_i + \Lambda_{mn}\tilde{n}_i + \bar{\Lambda}_{0m} \\ \tilde{n}_i &= \Lambda_{nm}\tilde{m}_i + \Lambda_{nn}\tilde{n}_i + \bar{\Lambda}_{0n}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Вычисленные значения координат  $\tilde{m}_i, \tilde{n}_i$  позволяют сформировать набор значений восстановленной абсолютной фазы путём выборки из интерферограммы абсолютной фазы:

$$\hat{\Psi}_i = \hat{\Psi}(\tilde{m}_i, \tilde{n}_i). \quad (3.6)$$

Эти фазы могут быть увязать с эталонными высотами  $\{H_{0i}\}$  через величину высоты неоднозначности [30, 34], и тогда для решения задачи оценивания точности было бы достаточно преобразовать эталонные высоты в эталонные фазы:

$$\Psi_{0i} = 2\pi\{H_{0i}/\{H_{Ai}\}, \quad (3.7)$$

или преобразовать восстановленные фазы в измеренные высоты:

$$\hat{H}_i = \{H_{Ai}\} \cdot \{\hat{\Psi}_i\} / 2\pi, \quad (3.8)$$

и затем применить какую-либо из оценок точности (1.35-1.40). Однако вследствие ранее отмеченной проблемы (раздел 3.1 настоящей работы) неточности определения параметров орбит носителей, и, как следствие, приближенного вычисления  $H_{Ai}$  и дополнительного фазового поля  $\varphi_{m,n}^C$  (1.17), используемой на этапе компенсации уклона фазы, высота неоднозначности будет иметь существенные погрешности. Поэтому для оценивания эффективности интерферометрической обработки целесообразно использовать не значения высот неоднозначности, а вычислять параметры связи фазы и высоты непосредственно из наборов значений  $\{\hat{\Psi}_i\}$  и  $\{H_{0i}\}$ , сформировав линейные преобразования эталонных высот в эталонные абсолютные фазы (3.9) и восстановленных абсолютных фаз в измеренные высоты (3.10):

$$\Psi_{0i} = \hat{U}_H H_{0i} + \hat{U}_m \tilde{m}_i + \hat{U}_n \tilde{n}_i + \bar{\Psi}_0, \quad (3.9)$$

$$\hat{H}_i = \hat{V}_\Psi \Psi_i + \hat{V}_m \tilde{m}_i + \hat{V}_n \tilde{n}_i + \bar{H}, \quad (3.10)$$

где  $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n$  — оценки коэффициентов масштабного искажения высот и углов перекоса фазы вдоль координат  $\tilde{m}$  и  $\tilde{n}$ ;  $\hat{V}_H, \hat{V}_m, \hat{V}_n$  — оценки коэффициентов масштабного искажения фаз и углов перекоса высот вдоль координат  $\tilde{m}$  и  $\tilde{n}$ ,  $\bar{\Psi}_0$  — оценка среднего значения эталонной фазы,  $\bar{H}$  — оценка среднего значения измеренной высоты.

Экспериментальный расчет коэффициентов  $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n$  и/или  $\hat{V}_H, \hat{V}_m, \hat{V}_n$  далее производится методом наименьших квадратов через решение переопределенных систем уравнений (3.9) и/или (3.10) по массиву эталонных высот:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_H \\ \hat{U}_m \\ \hat{U}_n \\ \bar{\Psi}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{01} & \tilde{m}_1 & \tilde{n}_1 & 1 \\ H_{02} & \tilde{m}_2 & \tilde{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{0N_{GCP}} & \tilde{m}_{N_{GCP}} & \tilde{n}_{N_{GCP}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_1 \\ \hat{\Psi}_2 \\ \dots \\ \hat{\Psi}_{N_{GCP}} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_H \\ \hat{V}_m \\ \hat{V}_n \\ \hat{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{01} & \tilde{m}_1 & \tilde{n}_1 & 1 \\ \hat{\Psi}_{02} & \tilde{m}_2 & \tilde{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\Psi}_{0N_{GCP}} & \tilde{m}_{N_{GCP}} & \tilde{n}_{N_{GCP}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} H_{01} \\ H_{02} \\ \dots \\ H_{0N_{GCP}} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

где  $N_{GCP}$  — размер массива эталонных высотных отметок.

Если трактовать абсолютную фазу не просто как развёрнутую интерферограмму, а именно как фазу, пропорционально связанную с высотой рельефа и учитывающую постоянный сдвиг и перекосы вдоль координат интерферограммы, то её можно выразить из формулы (3.10) следующим образом:

$$\hat{\Psi}_i = \hat{\Psi}_i + \frac{V_m \tilde{m}_i + V_n \tilde{n}_i + \hat{H}}{V_\Psi}, \quad (3.13)$$

где коэффициент  $V_\Psi$  приобретает смысл некоторой приведенной высоты неоднозначности  $\hat{H}_A$ , делённой на  $2\pi$ :

$$\hat{H}_i = V_\Psi \hat{\Psi}_i = \frac{\hat{\Psi}_i}{2\pi} \cdot \hat{H}_A, \quad (3.14)$$

однако в дальнейшем необходимости в использовании такой картины абсолютной фазы не возникнет.

Для космических радиолокационных данных компенсации одних только линейных перекосов будет недостаточно, как минимум, из-за влияния кривизны Земли, поэтому целесообразно в формулах (3.9), (3.10) учесть также квадратичные составляющие перекоса фазы, введя слагаемые, зависящие от коэффициентов искажений II порядка  $m^2, n^2$  и  $m \cdot n$ :

$$\Psi_{0i} = \hat{U}_H H_{0i} + \hat{U}_m \tilde{m}_i + \hat{U}_{m2} \tilde{m}_i^2 + \hat{U}_n \tilde{n}_i + \hat{U}_{n2} \tilde{n}_i^2 + \hat{U}_{mn} \tilde{m}_i \cdot \tilde{n}_i + \bar{\Psi}_0, \quad (3.15)$$

$$\hat{H}_i = \hat{V}_\Psi \Psi_i + \hat{V}_m \tilde{m}_i + \hat{V}_{m2} \tilde{m}_i^2 + \hat{k}_n \tilde{n}_i + \hat{V}_{n2} \tilde{n}_i^2 + \hat{V}_{mn} \tilde{m}_i \cdot \tilde{n}_i + \bar{H}. \quad (3.16)$$

Соответственно, матрицы (3.11), (3.12) будут иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_H \\ \hat{U}_m \\ \hat{U}_n \\ \hat{U}_{m2} \\ \hat{U}_{n2} \\ \hat{U}_{mn} \\ \hat{\Psi}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{01} & \tilde{m}_1 & \tilde{n}_1 & \tilde{m}_1^2 & \tilde{n}_1^2 & \tilde{m}_1 \cdot \tilde{n}_1 & 1 \\ H_{02} & \tilde{m}_2 & \tilde{n}_2 & \tilde{m}_2^2 & \tilde{n}_2^2 & \tilde{m}_2 \cdot \tilde{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{0N_{GCP}} & \tilde{m}_N & \tilde{n}_{N_{GCP}} & \tilde{m}_{N_{GCP}}^2 & \tilde{n}_{N_{GCP}}^2 & \tilde{m}_{N_{GCP}} \cdot \tilde{n}_{N_{GCP}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_1 \\ \hat{\Psi}_2 \\ \dots \\ \hat{\Psi}_{N_{GCP}} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_H \\ \hat{V}_m \\ \hat{V}_n \\ \hat{V}_{m2} \\ \hat{V}_{n2} \\ \hat{V}_{mn} \\ \hat{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{01} & \tilde{m}_1 & \tilde{n}_1 & \tilde{m}_1^2 & \tilde{n}_1^2 & \tilde{m}_1 \cdot \tilde{n}_1 & 1 \\ \hat{\Psi}_{02} & \tilde{m}_2 & \tilde{n}_2 & \tilde{m}_2^2 & \tilde{n}_2^2 & \tilde{m}_2 \cdot \tilde{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\Psi}_{0N_{GCP}} & \tilde{m}_{N_{GCP}} & \tilde{n}_{N_{GCP}} & \tilde{m}_{N_{GCP}}^2 & \tilde{n}_{N_{GCP}}^2 & \tilde{m}_{N_{GCP}} \cdot \tilde{n}_{N_{GCP}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} H_{01} \\ H_{02} \\ \dots \\ H_{0N_{GCP}} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Примеры преобразования эталонных высот и установления соответствия между эталонными высотами и абсолютными фазами интерферограммы приведены на рисунке 3.2.

Предложенный способ преобразования позволяет устранять систематическую ошибку восстановленной абсолютной фазы аналогично тому, как это происходит при ее геопривязке после интерферометрической обработки [150]. Результаты дальнейшего оценивания будут адекватны тем, что будут получены при оценивании точности цифровой модели рельефа в географической системе координат с той лишь разницей, что в них не будет присутствовать составляющая ошибки, обусловленная выполнением геопривязки абсолютной фазы. Таким образом, метод позволит производить оценку точности восстановления абсолютной фазы алгоритмами интерферометрической обработки на любом этапе интерферометрической обработки и в условиях неточности информации об орбитальном движении носителя РСА.

Используя рассчитанные оценки коэффициентов (3.11), (3.12) в формулах (3.9), (3.10) и получив наборы измеренных высот и эталонных абсолютных фаз, можно реализовать вычисление следующих критериев точности абсолютной фазы:

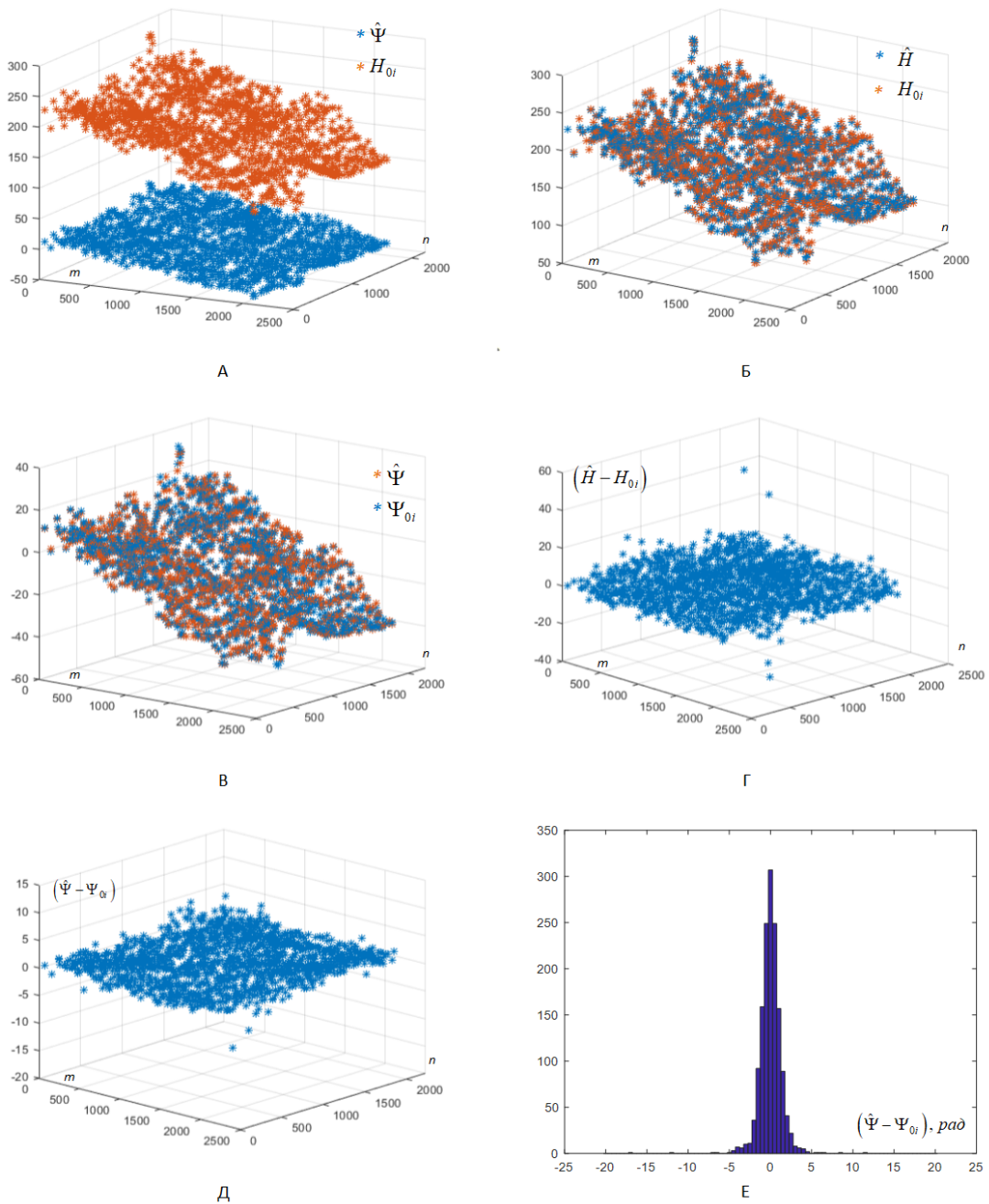


Рис. 3.2: Облака точек для абсолютных фаз и высот исследуемой сцены: А) абсолютных фаз  $\hat{\Psi}_i$  и эталонных высот  $H_{0i}$ ; Б) высот  $\hat{H}_i$  и эталонных высот  $H_{0i}$ ; В) абсолютных фаз  $\hat{\Psi}_i$  и эталонных фаз  $\Psi_{0i}$ ; Г) разностей высот и эталонных высот; Д) разностей восстановленных и эталонных фаз; Е) гистограмма разностей восстановленных и эталонных фаз

– среднеквадратичное отклонение высот в бортовой системе координат  $\sigma_H$ :

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{N_{GCP} - 1} \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (\hat{H}_i - H_{0i})^2}, \quad (3.19)$$

которое позволяет оценивать точность результата интерферометрической обработки в целом (за исключением геопривязки);

– среднеквадратичное отклонение абсолютной фазы  $\sigma_\Psi$ :

$$\sigma_\Psi = \sqrt{\frac{1}{N_{GCP} - 1} \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (\hat{\Psi}_i - \Psi_{0i})^2}, \quad (3.20)$$

которое позволяет охарактеризовать точность результатов различных алгоритмов обработки в совокупности и алгоритмов развертывания фазы в частности;

– для оценивания качества подавления фазового шума возможно использовать величину с.к.о. разностного фазового угла сглаженной и эталонной фаз  $\sigma_{\delta\varphi}$ , вычисляемого следующим образом:

$$\sigma_{\delta\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N_{GCP} - 1} \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (\delta\varphi)^2}, \quad (3.21)$$

где:

$$\delta\varphi = \arg \left\{ \frac{\exp [j(\Delta\varphi_i - \Psi_{0i})]}{\exp [j(\overline{\Delta\varphi}_i - \overline{\Psi}_{0i})]} \right\}, \quad (3.22)$$

где, в свою очередь,  $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi(\tilde{m}, \tilde{n})$  — набор относительных фаз,  $\overline{\Delta\varphi}_i$  и  $\overline{\Psi}_{0i}$  — средние значения соответствующих фаз.

Таким образом, разработанный метод преобразования эталонных высот позволяет оценить точность восстановления значений абсолютной и относительной фазы на разных этапах интерферометрической обработки путём сравнения полученных значений высот и фаз с их эталонными значениями. На его основе далее (разделы 3.3, 3.4, 3.5 настоящей работы) разработаны методики оценивания эффективности выполнения различных этапов интерферометрической обработки.

### 3.3 Методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы

Методика позволяет оценивать точность восстановления фазы при различных наборах параметров алгоритмов 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 карты высот  $\sigma_H$  от эталонных высот и среднеквадратичного отклонения восстановленной и эталонной абсолютных фаз  $\sigma_\Psi$ , полученные при различных комбинациях алгоритмов обработки, их параметров и условий обработки. Методика оценивания состоит из следующих этапов.

1. **Формирование набора исследуемых алгоритмов** развёртывания фазы  $\{\text{Alg\_U}_j\}$  и выбор алгоритма подавления фазового шума  $\text{Alg\_F}$  и набора значений его варьируемого параметра  $p_k^F$ .

2. **Подготовка эталонных данных**, которая включает отбор элементов набора эталонных высот  $\{B_i, L_i, H_{0i}\}$ , попадающих в границы сцены, радиолокационных ориентиров  $\{\dot{m}_k, \dot{n}_k\}$ .

3. **Предварительная интерферометрическая обработка радиолокационных данных**, которая включает взаимопривязку КРЛИ, формирование интерферограммы и компенсацию фазового набега интерферограммы от опорной поверхности с использованием орбитальных параметров из метаданных КРЛИ.

4. **Преобразование координат эталонных высот** к системе координат КРЛИ-1 по соотношению (3.1) и проверка расхождений координат с помощью набора радиолокационных ориентиров. При существенном (более 3–5 элементов разрешения) расхождении положений радиолокационных ориентиров и их преобразованных координат выполняется аффинное преобразование координат (3.2)-(3.5).

5. **Выполнение интерферометрической обработки** с использованием алгоритма подавления фазового шума  $\text{Alg\_F}$  с параметром  $p_k^F$  и развёртывание фазы исследуемым алгоритмом  $\text{Alg\_U}_j$ . В результате будет получена двумерная абсолютная фаза  $\hat{\Psi}(\tilde{m}, \tilde{n})$ :

$$\hat{\Psi}^{(j,k)} = \left( \text{Alg\_U}_j \left( \text{Alg\_F} \left( \Delta\varphi^C(\tilde{m}, \tilde{n})|_{p_k^F} \right) \right) \right). \quad (3.23)$$

6. **Выборка** из интерферограммы двумерной абсолютной фазы значений, соответствующей



ЮЩИХ ПОЛОЖЕНИЯМ ЭТАЛОННЫХ ВЫСОТНЫХ ОТМЕТОК:

$$\hat{\Psi}^{(j,k)} \rightarrow \{\hat{\Psi}_i^{(j,k)}(\tilde{m}_i, \tilde{n}_i)\}. \quad (3.24)$$

**7. Вычисление параметров преобразования фаз**  $\hat{V}_H^{(j,k)}, \hat{V}_m^{(j,k)}, \hat{V}_n^{(j,k)}, \hat{V}_{m2}^{(j,k)}, \hat{V}_{n2}^{(j,k)}, \hat{V}_{mn}^{(j,k)}$  по соотношению (3.12) или (3.18) для построения семейств характеристик точности  $\sigma_H^{(j,k)}$  для высот или параметров  $\hat{U}_H^{(j,k)}, \hat{U}_m^{(j,k)}, \hat{U}_n^{(j,k)}, \hat{U}_{m2}^{(j,k)}, \hat{U}_{n2}^{(j,k)}, \hat{U}_{mn}^{(j,k)}$  по соотношению (3.11) или (3.17) для построения семейств характеристик точности  $\sigma_\Psi^{(j,k)}$  для фаз и выполнение процедур метода преобразования эталонных высот по соотношениям (3.10), (3.16) или (3.9), (3.15).

**8. Вычисления** значений с.к.о. абсолютных фаз  $\sigma_\Psi^{(j,k)}$  или абсолютных высот  $\sigma_H^{(j,k)}$ .

**9. Построение экспериментальных характеристик точности** восстановления абсолютной фазы. Полученные значения с.к.о. для всех алгоритмов развёртывания фазы группируются в семейство графиков  $\sigma_H^{(j,k)}(p_k^F)$  или  $\sigma_\Psi^{(j,k)}(p_k^F)$ . **10. Анализ полученных результатов** для определения алгоритмов, обеспечивающих минимальное значение с.к.о. абсолютной фазы / абсолютной высоты.

Шаги 5–8 повторяются необходимое количество раз для всех комбинаций Alg\_U<sub>j</sub> и  $p_k^F$ .

### 3.4 Методика оценивания эффективности подавления фазового шума

Для оценивания эффективности подавления фазового шума можно использовать тот же эталон абсолютной фазы, что и при реализации методики оценивания точности восстановления абсолютной фазы. Для получения параметров преобразования эталонных высот к эталонным фазам по соотношениям (3.9), (3.12) потребуется однократно произвести развёртывание фазы интерферограммы, полученной при произвольном значении частоты фильтра фазового шума  $F_S^*$ , вычислить параметры преобразования (3.9) и эталонные абсолютные фазы (3.12), а затем вычислять с.к.о. относительных фаз  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(k)}(p_k^F)$  при различных значениях параметра фильтра фазового шума  $p_k^F$  или другого исследуемого параметра. Далее (раздел 3.4) будет показано, что выбор частоты  $F_S^*$  слабо влияет на форму характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(k)}(p_k^F)$  — положение её минимума сохраняется, а его величина снижается на сотые доли радиана по мере роста  $F_S^*$ .

Таким образом, методика оценивания эффективности подавления фазового шума бу-

дет включать следующие шаги:

1–4. Шаги повторяют предыдущую методику, при этом на шаге 1 формируется набор исследуемых алгоритмов фильтрации фазового шума  $\text{Alg\_F}_j$  и их варьируемых параметров  $p_{j,k}^F$ .

5. **Выполнение интерферометрической обработки** с использованием гауссового (или другого) фильтра фазового шума с параметром  $F_S^*$  и развёртывание фазы алгоритмом MCF или ВВПФ.

6. **Выборка** из полученной на предыдущем шаге интерферограммы двумерной абсолютной фазы значений, соответствующих положениям эталонных высотных отметок  $\hat{\Psi}_i^{(j,k)}(\tilde{m}_i, \tilde{n}_i)$ .

7. **Вычисление параметров преобразования высот**  $\hat{U}_H^*, \hat{U}_m^*, \hat{U}_n^*, \hat{U}_{m2}^*, \hat{U}_{n2}^*, \hat{U}_{mn}^*$  по соотношению (3.17) и выполнение процедур метода преобразования эталонных высот по соотношению (3.15).

8. **Выполнение фильтрации фазового шума** алгоритмом  $\text{Alg\_F}_j$  с параметром  $p_{j,k}^F$  и получение сглаженной интерферограммы.

9. **Выборка** из сглаженной интерферограммы значений, соответствующих положениям эталонных высотных отметок.

10. **Вычисления** значений с.к.о. относительных фаз  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(j,k)}(p_{j,k}^F)$  по соотношениям (3.21)-(3.22).

11. **Построение экспериментальных характеристик** эффективности подавления фазового шума  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(j,k)}(p_{j,k}^F)$ , при этом характеристики (или семейства характеристик, полученных при варьировании коэффициента накопления интерферограммы) для разных алгоритмов строятся, как правило, в разных системах координат.

12. **Анализ полученных результатов** для определения алгоритмов, обеспечивающих минимальное значение с.к.о. относительной фазы.

### 3.5 Методика сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар

Декорреляция радиолокационных эхо-сигналов (от всех источников) приводит к появлению фазовых шумов различной интенсивности и снижению точности измерения интерферометрической фазы. Связь между величиной когерентности и среднеквадратичным

отклонением интерферометрической фазы, вызванным фазовым шумом, устанавливается выражением (1.27). Предлагаемая методика сравнения эффективности способов оценивания когерентности интерферометрических пар основана на построении характеристик зависимостей среднеквадратичного отклонения фазового шума от величины когерентности  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  с использованием эталонных цифровых моделей рельефа и сравнении их формы с эталонной характеристикой  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$ , определяемой соотношением (1.27).

Далее рассматриваются два варианта реализации методики: с вычислением  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  по массиву эталонных отметок высот и с вычислением  $\sigma_{\Delta\varphi}(\hat{\rho})$  по интерферограмме фазового шума. Первый вариант реализации позволяет оценить взаимосвязь величины когерентности и точности измерения фаз интерферометрической радиолокационной системой и сделать выводы о возможности прогнозирования точности восстановления абсолютной фазы по величине когерентности. Второй вариант реализации позволяет непосредственно сравнить эффективность способа оценивания когерентности на предмет соответствия получаемых характеристик  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  теоретической характеристике  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$ . Во втором варианте для получения интерферограммы фазового шума используется восстановленная абсолютная фаза, обладающая минимальным среднеквадратичным отклонением от эталонной абсолютной фазы, т.е. такая абсолютная фаза  $\hat{\Psi}_{m,n,opt}$ , для которой значение  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}$  будет минимальным после анализа по методике раздела 3.3 настоящей работы. Принимая данную абсолютную фазу за эталон топографической фазы, можно вычислить интерферограмму, содержащую только шумовую составляющую интерферометрической фазы — интерферограмму фазового шума  $\Delta\varphi_{noise}$ :

$$\Delta\varphi_{noise,m,n} = \arg \left\{ \exp \left[ j \left( \Delta\varphi_{m,n} - \hat{\Psi}_{m,n,opt} \right) \right] \right\}. \quad (3.25)$$

Для построения характеристик  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  весь диапазон значений коэффициента когерентности  $[0..1]$  на равные интервалы  $\Delta\rho_l$  (далее использовалось разбиение на 10 интервалов при вычислениях по массиву эталонных отметок высот и 20 интервалов — при вычислениях по интерферограмме фазового шума) и выборки элементов карты когерентности  $\hat{\rho}_{m,n}$ , массива эталонных отметок высот  $\{m, n, Psi_0\}$ , интерферограммы относительной фазы  $\Delta\varphi_{m,n}$  либо из интерферограммы фазового шума  $\Delta\varphi_{noise,m,n}$  следующим образом:

— при вычислениях характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  по массиву эталонных отметок высот производятся выборка значений коэффициента когерентности в  $l$ -м интервале  $\delta\rho_l$  —  $\{\hat{\rho}_{m_i,l,n_i,l}\}$ , выборка значений интерферометрических фаз в тех же положениях на ин-

терферограмме —  $\Delta\varphi_{m_i,l,n_i,l}$  и выборка соответствующих им эталонных отметок высот  $\{m_l, n_l, \Psi_{0l}\}$ ;

— при вычислениях характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  по интерферограмме фазового шума производятся выборка значений коэффициента когерентности в  $l$ -м интервале  $\delta\rho_l$  —  $\{\hat{\rho}_{m_i,l,n_i,l}\}$  и выборка значений из интерферограммы фазового шума в тех же положениях —  $\Delta\varphi_{noise,m_l,n_l}$ .

Далее в обеих реализациях методики производится вычисление  $\sigma_{\Delta\varphi_l}$  (аналогично методике оценивания эффективности подавления фазового шума — раздел 3.4) отдельно в каждом  $l$ -м интервале значений когерентности.

Для расчёта теоретической характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$  используется выражение (1.27) для плотности распределения фазового шума в зависимости от величины коэффициента когерентности с учётом накопления элементов интерферограммы. Теоретическое среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\varphi,0}$  при этом рассчитывается как квадратный корень из второго центрального момента от (1.27):

$$\sigma_{\Delta\varphi,0} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (\Delta\varphi - M\{\Delta\varphi\})^2 p(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) d\Delta\varphi}, \quad (3.26)$$

где  $M\{\Delta\varphi\}$  — математическое ожидание случайной величины  $(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)$ , представляющее собой топографическую составляющую фазы (при использовании эталона топографической фазы  $M\{\Delta\varphi\} = 0$ ). Интеграл (3.26) не вычисляется аналитически [34, 151], и расчёт  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$  производился методом прямоугольников с шагом  $\Delta_{\Delta\varphi} = 0.001$  рад. Вид теоретических характеристик  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$  представлен на рисунке 3.3

Методика сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар включает следующие шаги:

Шаги 1–7 повторяют предыдущую методику (раздел 3.4 настоящей работы), при этом на шаге 1 формируется набор исследуемых способов оценивания когерентности  $Alg\_p^j$  и, если необходимо, их варьируемого параметра — размера окна оценивания  $p_{j,k}^p \rightarrow N_{Wk}$ ;

**8. Вычисление карты когерентности  $\hat{\rho}_{m,n}^j$   $j$ -м способом;**

**9. Разбиение диапазона возможных значений коэффициента когерентности на равные интервалы, вычисление теоретического значения среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho_l)$  в соответствии с выражениями (1.27), (3.26) для центрального значения каждого интервала;**

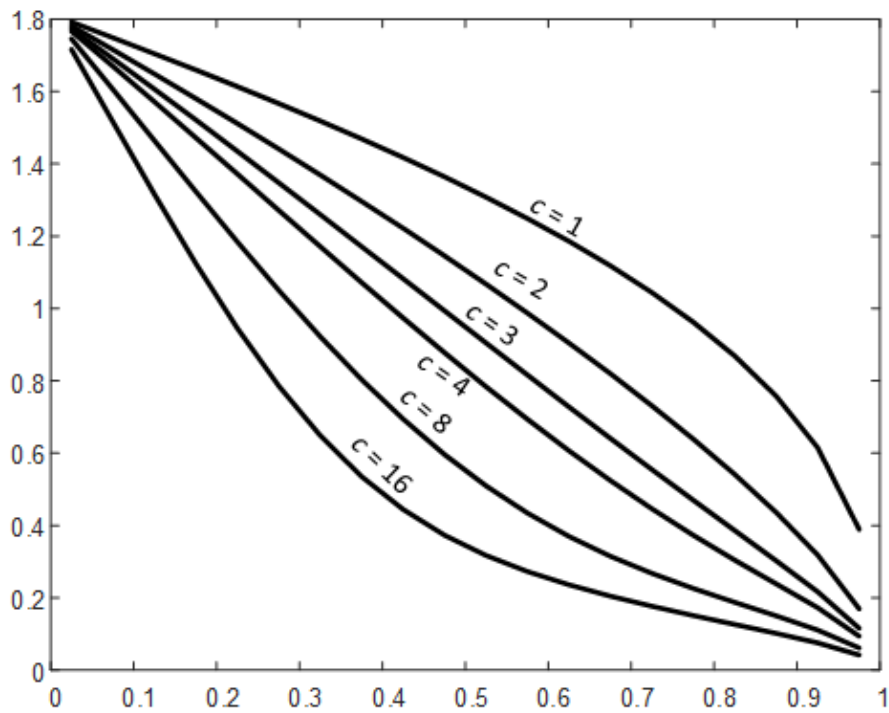


Рис. 3.3: Теоретические характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho)$  при различных коэффициентах накопления

10. **Выборка** значений из карты когерентности, массива эталонных отметок высот, интерферограммы относительной фазы либо из интерферограммы фазового шума, соответствующих  $l$ -му интервалу значений когерентности;

11. **Вычисление среднеквадратичного отклонения фаз** в  $l$ -м интервале —  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho_l)$ . При вычислениях по массиву эталонных отметок высот с.к.о. рассчитывается в соответствии с выражениями (3.21)-(3.22), при вычислениях по интерферограмме фазового шума с.к.о. рассчитывается непосредственно по всем значениям  $l$ -й выборки из интерферограммы фазового шума.

Шаги 10–11 повторяются для всех интервалов значений коэффициента когерентности  $\delta\rho_l$ .

12. **Построение характеристик** эффективности способов оценивания когерентности  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(j,k)}(l, N_{Wk})$  и теоретической характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho_l)$  на одном графическом поле;

13. **Анализ полученных результатов** на предмет соответствия формы полученных характеристик эффективности способов оценивания когерентности форме теоретической характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^0(\rho_l)$ .

### 3.6 Выводы по главе 3

3.1. Проанализированы проблемы интерпретации ЦМР, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии, определены требования к тестовым участкам. Для экспериментального оценивания точности предложено использовать эталон в виде набора отметок высот топографических карт.

3.2. Разработан метод преобразования эталонных высот для оценивания точности восстановления абсолютной фазы и высоты рельефа, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных, заключающийся в расчёте параметров преобразования эталонных высот в значений эталонных абсолютных фаз и расчёте среднеквадратичных отклонений абсолютных и эталонных фаз либо измеренных и эталонных высот. Метод преобразования минимально использует орбитальные координатные данные и не требует завершения интерферометрической обработки.

3.3. На основе метода преобразования эталонных высот разработана методика оценивания эффективности развёртывания фазы при интерферометрической обработке, позволяющая получать семейства характеристик точности абсолютной фазы или высоты ЦМР (по критерию с.к.о. абсолютных фаз или высот) при различных значениях параметров алгоритмов интерферометрической обработки и экспериментально оценивать эффективность алгоритмов развёртывания фазы без завершения всей процедуры интерферометрической обработки.

3.4. На основе метода преобразования эталонных высот разработана методика оценивания эффективности подавления фазового шума, позволяющая получать семейства характеристик точности интерферометрической фазы (по критерию минимума с.к.о. разностного фазового угла) и экспериментально оценивать эффективность алгоритмов фильтрации фазового шума и межэлементного некогерентного накопления.

3.5. Предложена методика сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар, заключающаяся в получении зависимостей среднеквадратичного отклонения фазового шума интерферограмм от величины оценки когерентности и анализе этих характеристик для разных оценок на предмет соответствия их формы теоретически рассчитанной зависимости. Методика позволяет определить оценки, наилучшим способом предсказывающие точность цифровых моделей рельефа, полученных при интерферометрической обработке.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Произведён анализ точности алгоритма выравнивания встречного вихревого поля для развёртывания фазы и показана его эффективность. Предложена модификация последовательности интерферометрической обработки, заключающаяся в развёртывании фазы несглаженной интерферограммы с последующей фильтрацией остаточной интерферограммы, и показана её эффективность. Показано, что оценка когерентности, не учитывающая амплитуды комплексных радиолокационных изображений, позволяет точнее других оценок предсказывать величину снижения точности восстановленной абсолютной фазы при воздействии фазового шума. Показано, что линейные гауссовы фильтры обладают достаточной эффективностью для подавления фазового шума, обеспечивая приемлемую точность фазы при низких вычислительных затратах.*

### 4.1 Характеристики данных

Исследуемые радиолокационные данные получены PCA PALSAR космического аппарата ALOS ( $\lambda = 23,5$  см,  $L$ -диапазон) и представлены пятью интерферометрическими парами КРЛИ трёх разных местностей (рис. 4.3, таблица 4.1). КРЛИ получены при горизонтальной поляризации излучённой волны и горизонтальной (НН/ГГ) либо вертикальной (НВ/ГВ) поляризации отражённой волны. Съёмки производились в летний сезон, временной интервал между съёмками во всех сценах — 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 (FBD):  $c_R = 1$  или  $c_R = 2$ , и не менее четверти от исходного — для режима съёмки с одиночной поляризацией (FBS):  $c_R = 2$  или  $c_R = 4$ . Величина коэффициента накопления по поперечной дальности подбиралась так, чтобы интервалы пространственной дискретизации по поперечной и наклонной дальностям были приблизительно одинаковыми, что соответствует  $c_A = 4$  при  $c_R = 1$  и  $c_A = 8$  при  $c_R = 2$ . Для оценивания точности использовались фрагменты КРЛИ и интерферограмм, охватывающие участки территории размером  $15 \times 15$  км (до  $2000 \times 4800$  элементов интерферограммы).

Эталонные высотные отметки рельефа тестовых участков получены из цифровых то-

Таблица 4.1: Параметры исследуемых интерферометрических пар КРЛИ

№ интерферограммы	Режим съёмки	Пространственное разрешение: азимут × накл. дальность)	$H_a$ (средняя), м	Исходная размерность интерферограммы	Тип рельефа	С.к.о. значений эталонных высот (средний размах рельефа), м
1	FBD (HH)	15,0×3,1	18	17800×4300	холмистый	14,5
2	FBD (HV)	15,0×3,1	18	17800×4300	холмистый	14,5
3	FBS	7,5×3,1	60	21700×10500	холмистый	19,3
4	FBS	7,5×3,1	125	18400× 9200	холмистый	14,5
5	FBS	7,5×3,1	45	22000×10600	низкоргорный	65,8

пографических карт (ЦТК) масштаба 1:100 000. Поскольку источником эталонных отметок высот являются ЦТК, изготовленные в РСФСР и Российской Федерации, то координаты отметок исчисляются в Системе координат 1995 года (СК-95 и её модификациях) на эллипсоидах, определённых Параметрами Земли 1990 года (ПЗ-90 и его модификациями). Отметки высот заданы в нормальной системе высот — Балтийской системе высот 1977 года (БСВ-77). Координаты наземных радиолокационных ориентиров получены с использованием геодезического GPS/GNSS-приёмника Leica AX 1202 GG с дифференциальной коррекцией координат (рис. 4.1, 4.2), также использовались отметки высот ЦТК, расположенные на хорошо опознаваемых на АРЛИ элементах местности. Преобразование координат отметок высот и ориентиров в систему координат КРЛИ осуществлялось с использованием преобразователя «Map to Slant/Ground Conversion» программного комплекса SARscape, и далее визуально оценивались невязки положений ориентиров относительно их положения на АРЛИ. Во всех случаях величины невязок составляли не более 1-2 элементов разрешения, из-за чего преобразования (3.3)-(3.5) не выполнялись. Пример сети положений отметок высот и радиолокационных ориентиров для интерферограммы № 1 приведён на рис. 4.3.

Для обеспечения согласованности систем координат эталонных отметок высот и географической системы координат, используемой бортовой навигационной аппаратурой РСА (Всемирная геодезическая система координат 1984 года — WGS-84), координа-



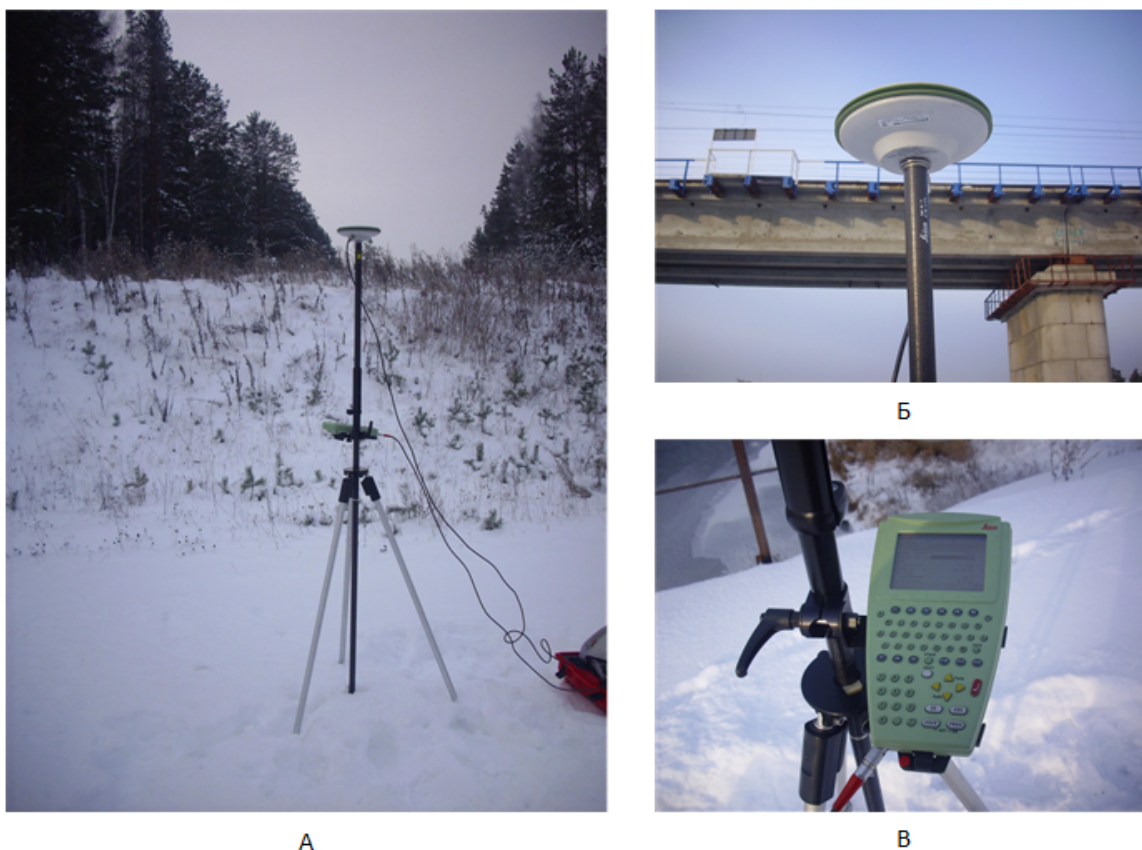


Рис. 4.1: Определение координат наземных радиолокационных ориентиров с использованием приёмника сигналов глобальных спутниковых навигационных систем Leica AX 1202 GG: А) общий план; Б) антенна; В) блок управления

ты эталонных высотных отметок преобразованы в систему WGS-84 в следующей последовательности (на примере СК-42): СК-42(прямоугольн.)/БСВ-77 → СК-42(Широта-Долгота)/геодезические высоты → СК-42 (геоцентр.) → WGS-84 (геоцентр.) → WGS-84(Широта-Долгота)/геодезические высоты.

Преобразование высот из БСВ-77 в геодезические высоты производится с использованием квазигеоида, соответствующего эллипсоиду Красовского [147] путём добавления к нормальной высоте величины её аномалии.

## 4.2 Оценка точности предложенного алгоритма развёртывания фазы

С использованием методики, предложенной в разделе 3.3, произведена оценка влияния на точность абсолютной фазы при различных способах реализации предложенного алгоритма (ВВПФ): рекурсивной реализации, реализаций с использованием зеркального отображения интерферограммы, реализации с фильтрацией фазы с адаптивно подбирае-



Рис. 4.2: Измерение координат наземных радиолокационных ориентиров: общий вид местности (А.1, Б.1, В.1); вид на кадрах спектрзональной оптической съёмки сверхвысокого разрешения (А.2, Б.2, В.2), вид на АРЛИ (А.3, Б.3, В.3)

мой частотой среза АЧХ фильтра. Также предложена модификация последовательности интерферометрической обработки, при которой развёртывание фазы и подавление фазового шума производятся параллельно, после чего результаты операций объединяются. В качестве обрабатываемых радиолокационных данных использовались интерферограммы №№ 1, 3 и 5. Для интерферограммы № 1 (режим FBD/HH) применялся коэффициент накопления  $32 \times 8$ , для интерферограмм №№ 3 и 5 (режим FBS) —  $32 \times 16$ .

### 1. Влияние рекурсивной реализации алгоритма.

Для оценки эффективности рекурсивной реализации алгоритма выравнивания встречного вихревого поля строились характеристики точности абсолютной фазы для следующих вариантов:

- восстановление только безразрывной абсолютной фазы с однократным применением алгоритма без использования рекурсивного выравнивания;
- восстановление конгруэнтной абсолютной фазы (по правилу (2.16) с однократным

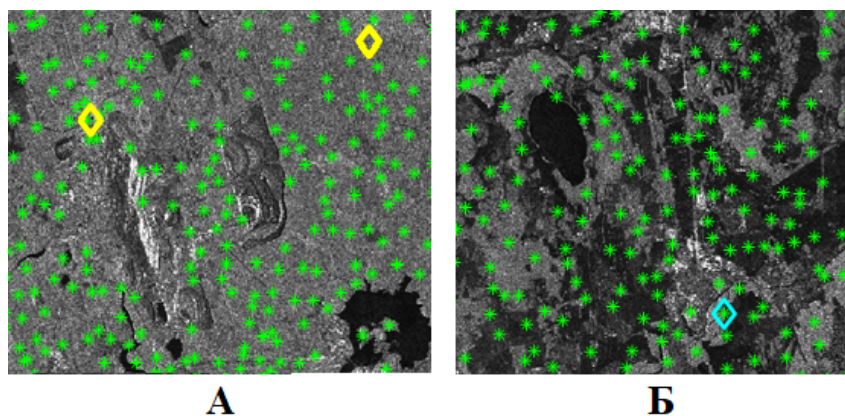


Рис. 4.3: Фрагменты АРЛИ с расположением эталонных высотных отметок (\*), наземных радиолокационных ориентиров, полученных при полевой съёмке (◇), и радиолокационных ориентиров из опознаваемых на АРЛИ эталонных высотных отметок (◇): А) для интерферограммы № 1; Б) для интерферограммы № 3

применением алгоритма без использования рекурсивного выравнивания;

- восстановление безразрывной и конгруэнтной (восстановленной по правилу (2.16) абсолютных фаз после трёхкратного применения алгоритма к остаточной интерферограмме без использования рекурсивного выравнивания;

- рекурсивное развёртывание (1 и 2 цикла).

Результаты сравнения представлены на рис. 4.4, и из них можно сделать следующие выводы:

- при однократном применении алгоритма точность безразрывной абсолютной фазы оказывается как выше, так и ниже, чем конгруэнтной;

- при увеличении числа циклов применения алгоритма к остаточной интерферограмме точность восстановленной абсолютной фазы повышается, однако выигрыш по точности с каждым новым проходом становится всё менее существенным;

- рекурсивная реализация обеспечивает наилучшую точность восстановления фазы, которая оказывается выше, чем точность конгруэнтной абсолютной фазы после трёх циклов алгоритма без использования рекурсивного выравнивания, на величину от 13% (интерферограмма № 2) до 22% (интерферограмма № 5). Добавление второго цикла развёртывания остаточной интерферограммы рекурсивным алгоритмом либо не приводит к выигрышу в точности и, следовательно, нецелесообразно.

## 2. Влияние зеркалирования интерферограммы.

Для оценки эффективности зеркального отображения интерферограммы с помощью характеристик точности абсолютной фазы были рассмотрены следующие варианты реа-

лизации алгоритма:

- рекурсивная реализация без зеркалирования интерферограммы;
- рекурсивная реализация с зеркалированием интерферограммы только при фильтрации;
- рекурсивная реализация с зеркалированием интерферограммы как при фильтрации, так и при развёртывании фазы.

Вычислительный эксперимент показал, что при полном отсутствии зеркалирования артефакты развёртывания накапливаются на краях интерферограммы (рис. 4.5) и препятствуют завершению работы алгоритма. Результаты сравнения вариантов алгоритма с зеркалированием только при фильтрации фазового шума и с зеркалированием как при фильтрации, так и при развёртывании фазы, представлены на рисунке 4.6 в виде характеристик относительной разности среднеквадратичной ошибки измерения рельефа для двух вариантов. Из характеристик можно сделать вывод, что применение зеркалирования при развёртывании фазы практически не влияет на точность получаемой карты высот, относительная разность среднеквадратичных отклонений не превышает 5%, а в большинстве случаев составляет 1-2% от  $\sigma_H$ . Таким образом, при интерферометрической обработке целесообразно использование зеркалирование интерферограммы только при фильтрации фазового шума.

### **3. Влияние адаптивной фильтрации.**

Для оценки эффективности гауссовой фильтрации с адаптивно подбираемой частотой среза АЧХ фильтра, выполняемой после рекурсивного построения безразрывной фазы, были построены характеристики точности абсолютной фазы при различных количествах циклов пост-фильтрации (рис. 4.8). Из характеристик можно сделать вывод, что несколько циклов такой фильтрации (3–5) увеличивают точность получаемого результата (примерно на 10%), и, учитывая малую вычислительную сложность процедуры, можно сделать вывод о предпочтительности её использования при реализации алгоритма развёртывания.

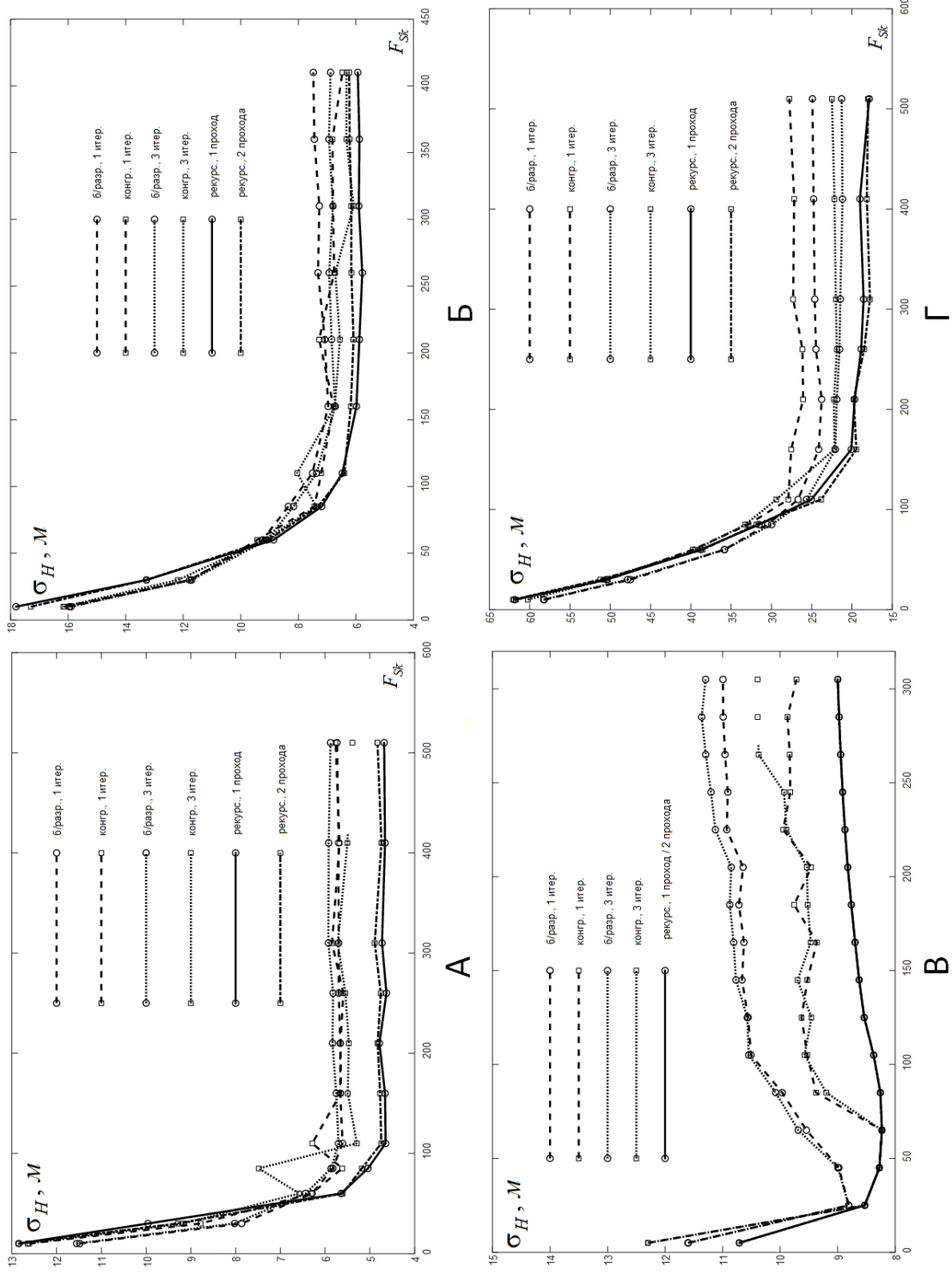


Рис. 4.4: Характеристики точности абсолютной фазы для различных вариантов выравнивания встречного вихревого поля: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 3; В) интерферограмма № 4; Г) интерферограмма № 5

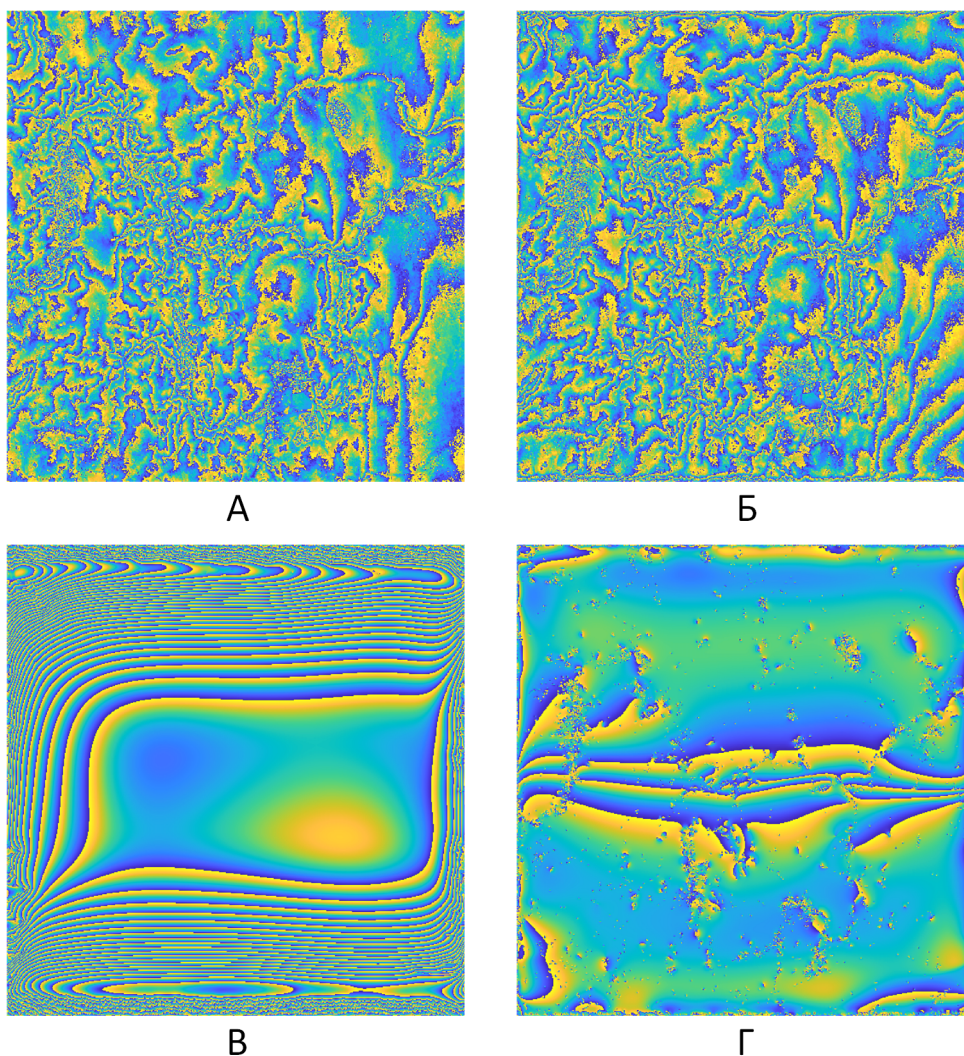


Рис. 4.5: Краевые эффекты при развёртывании интерферограммы без зеркалирования: А) исходная интерферограмма (интерферограмма № 1); Б) интерферограмма после 10 итераций 2.14; В) остаточная интерферограмма после 350 итераций (выполнение не завершено); Г) остаточная интерферограмма при коэффициенте накопления  $16 \times 4$  после 54 итераций (выполнение завершено)

#### 4. Развёртывание интерферограммы несглаженной фазы.

Поскольку при подавлении фазового шума будут, среди прочего, происходить как вымывание мелких деталей рельефа, так и «склеивание» близко расположенных интерференционных полос, то целесообразно рассмотреть эффективность (с точки зрения повышения точности результата интерферометрической обработки) модификаций последовательности обработки путём полной перестановки местами этапов развёртывания фазы и подавления фазового шума или параллельного выполнения развёртывания фазы и фильтрации фазового шума. В полной перестановке этапы полностью меняются местами, а фильтрация фазового шума производится по восстановленной абсолютной фазе. В мо-

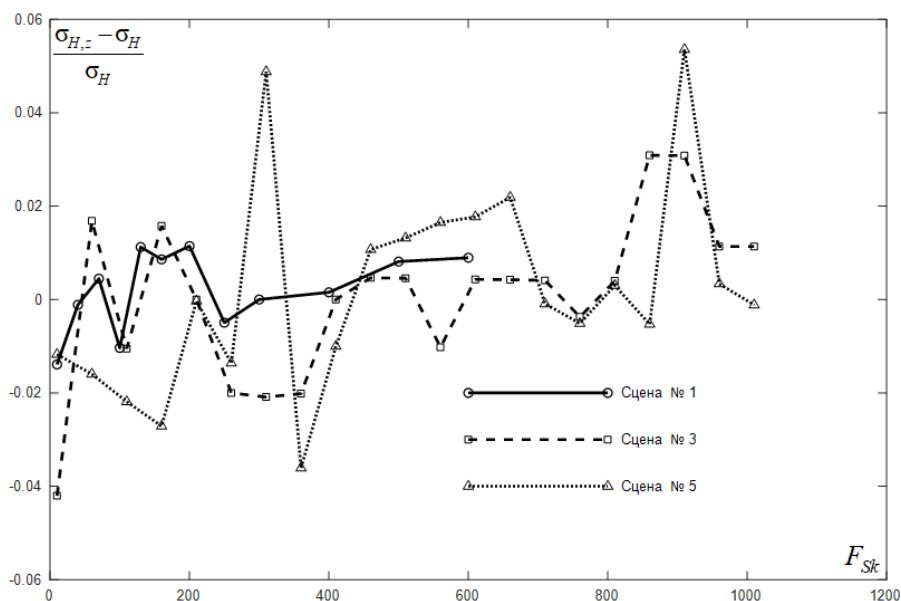


Рис. 4.6: Относительная разность среднеквадратичной ошибки измерения рельефа при развёртывании интерферограммы с зеркалированием только про фильтрации фазового шума ( $\sigma_H$ ) и с зеркалированием как при фильтрации, так и при развёртывании фазы ( $\sigma_{H,z}$ )

дификации последовательности интерферометрической обработки с параллельным выполнением этапов (рис. 4.8) подавление фазового шума производится по отношению к выровненной интерферограмме с накоплением элементов, одновременно для этой же интерферограммы производится развёртывание фазы, далее вычисляется остаточная интерферограмма  $\hat{I}_\delta(z)$ , для которой производится пост-фильтрация, после чего безразрывная абсолютная фаза и выровненная остаточная интерферограмма суммируются.

Характеристики точности абсолютной фазы для рассматриваемых модификаций представлены на рис. 4.9, и из них можно сделать вывод, что при параллельном выполнении этапов подавления фазового шума и развёртывания фазы наилучшая точность результата сохраняется или даже увеличивается (интерферограммы №1, №3), при этом диапазон значений частоты среза фильтра, при котором достигаются наилучшие точности, расширяется в область малых частот, что упрощает выбор этого параметра.

### 4.3 Сравнительная оценка методов развёртывания фазы

В соответствии с методикой раздела 3.3 исследовались точности восстановления для четырёх алгоритмов развёртывания фазы:

- алгоритма функций Грина [57] (реализация в ПК PHOTOMOD RADAR);

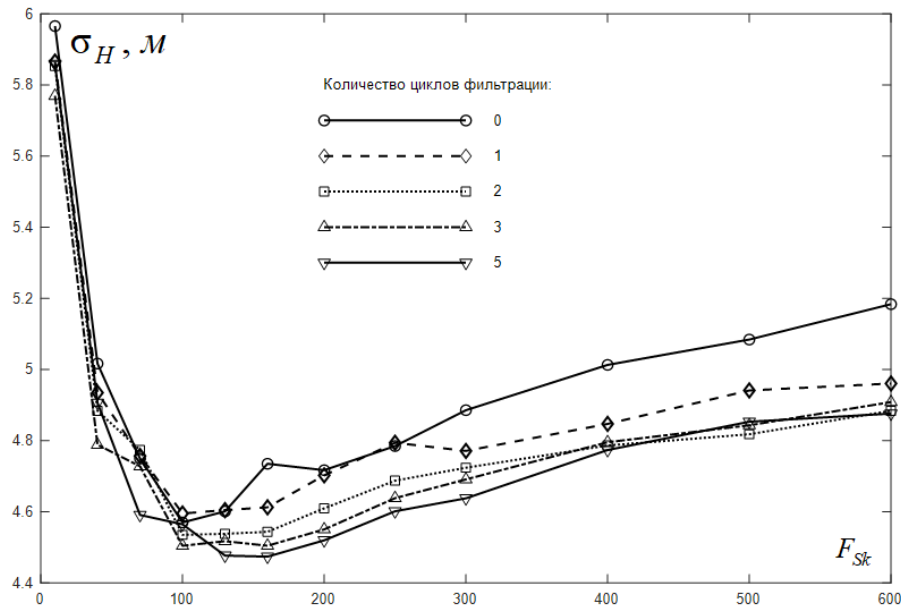


Рис. 4.7: Влияние пост-фильтрации остаточной интерферограммы на точность высот ЦМР

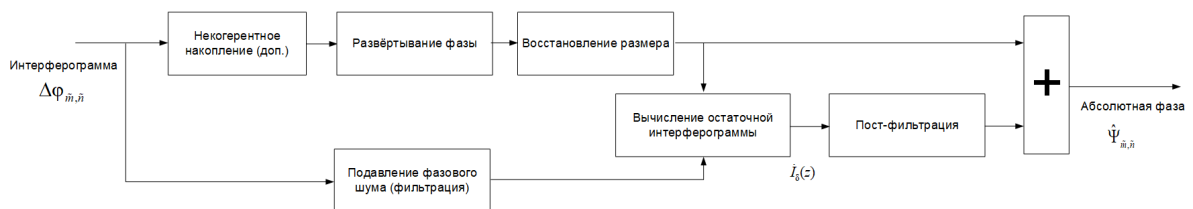


Рис. 4.8: Модификация последовательности интерферометрической обработки с развёртыванием фазы несглаженной интерферограммы

- алгоритма наименьших квадратов [124] (реализация в ПК PHOTOMOD RADAR);
- алгоритма минимальной стоимости потока [55, 59, 104] (реализация в ПК SARscape);
- алгоритма рекурсивного выравнивания встречного вихревого поля с зеркалированием сглаженной интерферограммы и пост-фильтрацией.

Для подавления фазового шума использовался двумерный гауссовый фильтр с равными частотами среза АЧХ по поперечной и наклонной дальностям. Эта же частота выступает в качестве варьируемого параметра при исследовании:  $p_k^F \rightarrow F_{Sk}$ .

Результаты построения характеристик точности развёртывания фазы  $\sigma_H^{(j,k)}(F_{Sk})$  для разных интерферограмм представлены на рис. 4.10-4.11, наилучшие результаты для алгоритмов ВВПФ и MCF, а также диапазоны значений параметра фильтра  $\Delta F_{S,10\%}$ , в пределах которых точность ухудшается не более, чем на 10 % от наилучшей, приведены в таблице 4.2. Результаты для интерферограммы № 4 не приводятся, так как развёртывание разными алгоритмами даёт одинаковый результат.



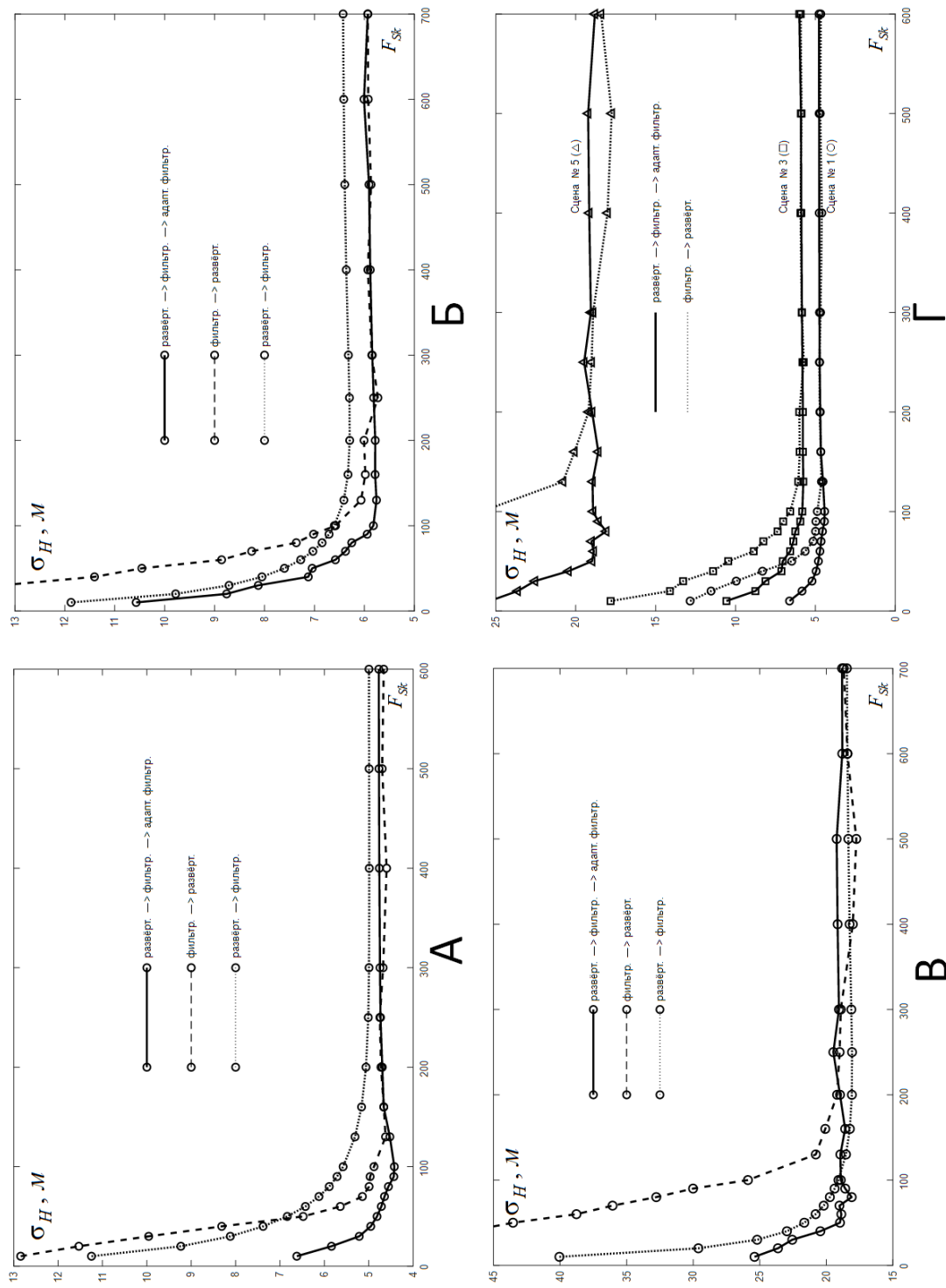


Рис. 4.9: Влияние порядка выполнения операций фильтрации и развёртывания фазы на точность восстановления карт высот: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 3; В) интерферограмма № 5; Г) сводные результаты

Таблица 4.2: Наилучшие точности восстановления абсолютной фазы для алгоритмов ВВПФ и МСФ

№ интерферограммы	Коэффициент накопления	$\sigma_{\Psi}$ , МСФ	$F_{S,\min}$ , МСФ	$\Delta F_{S,10\%}$ , МСФ	$\sigma_{\Psi}$ , ВВПФ	$F_{S,\min}$ , ВВПФ	$\Delta F_{S,10\%}$ , ВВПФ
1	8×2	4,11	200	220	4,32	180	450
1	4×1	4,67	90	35	4,33	200	450
2	8×2	4,85	150	120	5,18	90	220
2	4×1	5,05	130	60	5,15	30	210
3	8×4	5,49	200	260	5,45	170	330
3	4×2	5,17	250	270	5,02	150	320
5	8×4	12,03	400	270	11,32	150	270
5	4×2	12,12	400	220	12,05	130	220

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Наилучшими с точки зрения получаемой точности высоты рельефа оказались алгоритмы ВВПФ и МСФ. Наилучшая достигнутая точность измерения высоты рельефа (с.к.о. высот) составила 4,1 м — для сцены с холмистым рельефом (интерферограмма № 1) и 12,05 м (№ 5) — для сцены с низкогорным рельефом (при использовании алгоритмов МСФ и ВВПФ), что в целом соответствует результатам оценки точности радиолокационной интерферометрии в  $L$ -диапазоне, проводившейся различными авторами. При этом при развертывании алгоритмом МСФ, как было отмечено ранее (рис. 2.18), в области частот среза АЧХ фильтра в диапазоне 150...170 единиц частоты возникает срыв, выражающийся в появлении ложной интерференционной полосы на интерферограмме и приводящий к снижению точности карты высот на 1,7 м или 0,35 рад.

2. Почти во всех случаях точность восстановления высот оказалась сопоставима с таковой для алгоритма минимальной стоимости потока (разнонаправленные различия на 5–8% от наилучшего значения), при этом в сценах №№ 1 и 2 при коэффициенте накопления  $8 \times 4$  точность результата, полученного методом ВВПФ, оказалась незначительно ниже (на 30–40 см), чем у метода МСФ, что может быть связано с недостаточной способностью встречного вихревого поля огибать препятствия (разрывы) сложной формы, однако при уменьшении коэффициента накопления до  $4 \times 1$  алгоритм МСФ теряет работоспособ-

ность, демонстрируя точность на 8% хуже в пиковом значении и на 20–30% хуже, чем ВВПФ, при остальных значениях параметра фильтра.

3. Характеристика точности для алгоритма ВВПФ во всех рассмотренных случаях имеет меньшую чувствительность к изменению параметра  $F_{Sk}$ , при этом значение  $F_{Sk}$  в пределах 100...200 единиц оказывается оптимальным или близким к оптимальному для всех интерферограмм вне зависимости от режима съёмки при развёртывании фазы алгоритмом ВВПФ. Алгоритм MCF имеет большую вариативность оптимальных значений параметра  $F_{Sk}$ . Таким образом, при использовании развёртывания по алгоритму ВВПФ (с модифицированной последовательностью интерферометрической обработки и развёртыванием несглаженной фазы) выбор этого параметра при интерферометрической обработке становится проще.

4. Время обработки интерферограмм с коэффициентом межэлементного накопления  $4 \times 1$  и  $4 \times 2$  составляло от 38 до 95 секунд для алгоритма ВВПФ (при использовании дополнительного накопления  $4 \times 4$  несглаженной интерферограммы) и от 40 до 50 минут — при использовании алгоритма MCF (SARscape).

Результаты построения характеристик точности развёртывания фазы  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}(F_{Sk})$  представлены на рис. 4.12. Формы и взаимное расположение характеристик в областях средних и верхних частот в целом совпадают с аналогичными характеристиками для высот. Однако в области нижних частот характеристики алгоритмов MCF, функций Грина и наименьших квадратов стремятся к нулю, а ВВПФ (с модифицированной последовательностью интерферометрической обработки и развёртыванием несглаженной фазы) — к среднему значению эталонных фаз. При этом положения минимумов характеристик фаз и высот совпадают, что говорит о возможности использования любой из этих характеристик для поиска оптимальных значений параметров обработки.

Характеристики точности относительной фазы построены по методике, описанной в разделе 3.4 настоящей работы, для расчёта параметров преобразования (3.9) фильтрация интерферограммы не производилась ( $F_S^* = \infty$ ). По взаимному расположению характеристик относительной и абсолютной фазы можно сделать следующие выводы:

1. Характеристики точности фазы  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}(F_{Sk})$  по форме и положениям минимумов в целом совпадают с характеристиками точности восстановления высоты  $\sigma_H^{(j,k)}(F_{Sk})$ , их поведение отличается только в области нижних частот: при  $F_{Sk} \rightarrow 0$  характеристики  $\sigma_H^{(j,k)}(F_{Sk})$  стремятся к величине с.к.о. эталонных высот, а характеристики  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}(F_{Sk})$  — к нулю.

2. Форма характеристик точности алгоритма ВВПФ с параллельным выполнением этапов фильтрации и развёртывания фазы практически совпадает с формой характеристик для относительной фазы, но расположена на несколько десятых долей радиана ниже, также совпадают положения их минимумов.

3. Для алгоритма ВВПФ с.к.о. относительной фазы сглаженной интерферограммы  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(j,k)}(p_{j,k}^F)$  по форме совпадает с характеристикой для абсолютной фазы  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}(F_{Sk})$ , на первая располагается на 0.3–0.5 рад ниже, что позволяет делать вывод о влиянии артефактов развёртывания фазы на точность восстановленной абсолютной фазы и карты высот. Для других алгоритмов развёртывания форма характеристик точности абсолютной фазы в области нижних частот отличается от характеристики для относительной фазы, также отличаются и положения их минимумов, что может свидетельствовать о чрезмерном сглаживании деталей фазы и рельефа при фильтрации.

4. Разность между восстановленной абсолютной фазой (алгоритм ВВПФ) и относительной фазой варьируется от 0,01 до 0,5 рад (рис. 4.13), что позволяет делать заключения о влиянии артефактов развёртывания фазы на точность её восстановления. Так, для интерферограмм №№ 3 и 4 отличия характеристик точности абсолютной фазы для алгоритмов ВВПФ и МСФ в областях средних и верхних частот  $F_{Sk}$  практически совпадают с характеристиками относительной фазы по уровню, что свидетельствует о крайне незначительном вкладе артефактов развёртывания фазы в снижение точности восстановления фазы. Однако данные интерферограммы получены при малых интерферометрических базах, и простота развёртывания фазы не позволяет получить высокой точности восстановления высот рельефа, что видно из результатов на рисунках 4.10–4.11. С другой стороны, для интерферограмм №№ 1 и 2, полученных при большой интерферометрической базе (в половину критической длины), точность восстановления высот оказывается наилучшей среди всех рассмотренных случаев.

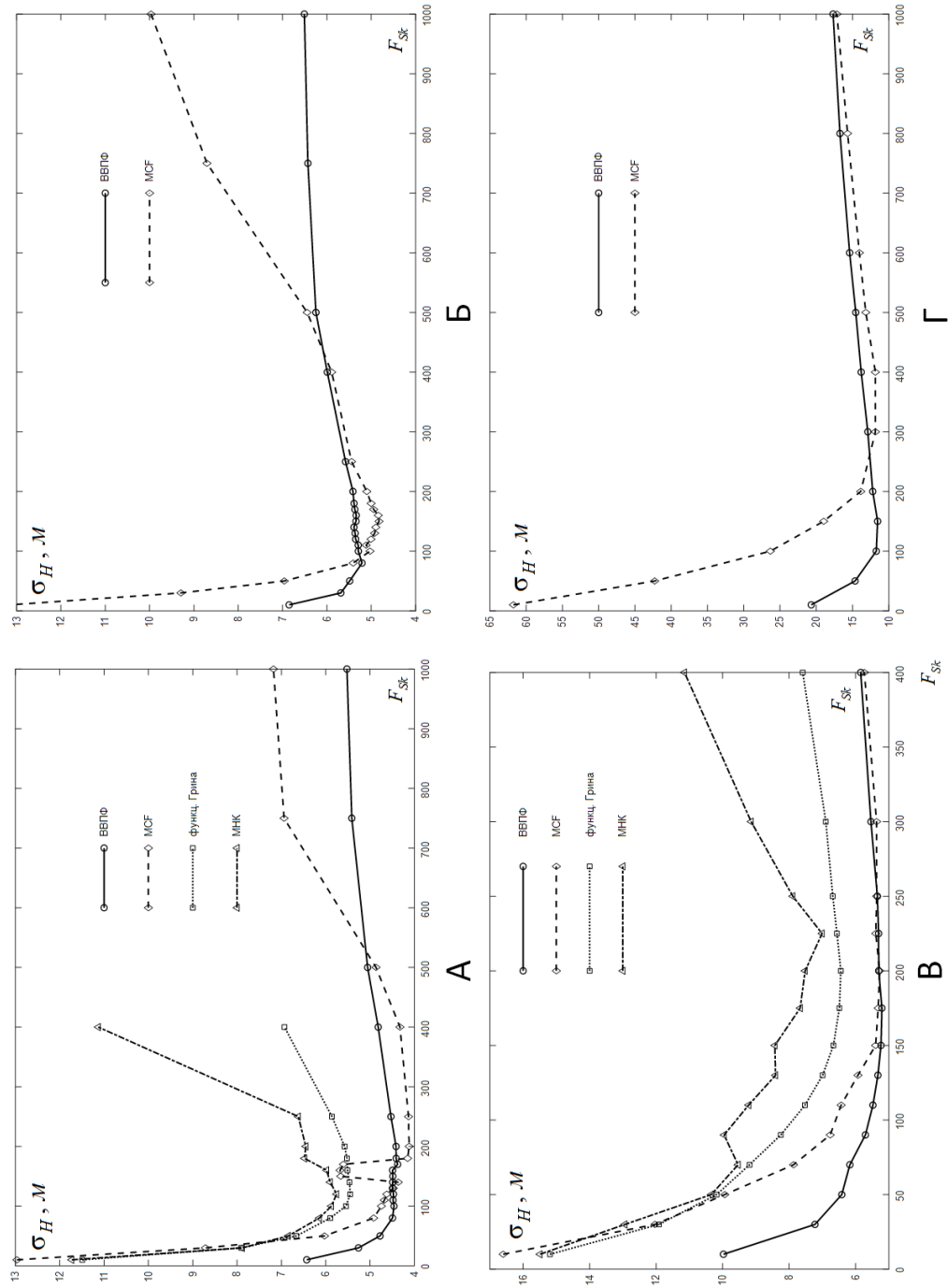
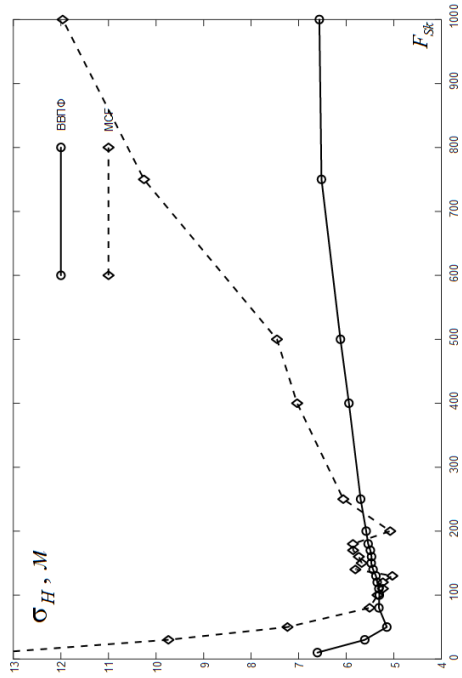
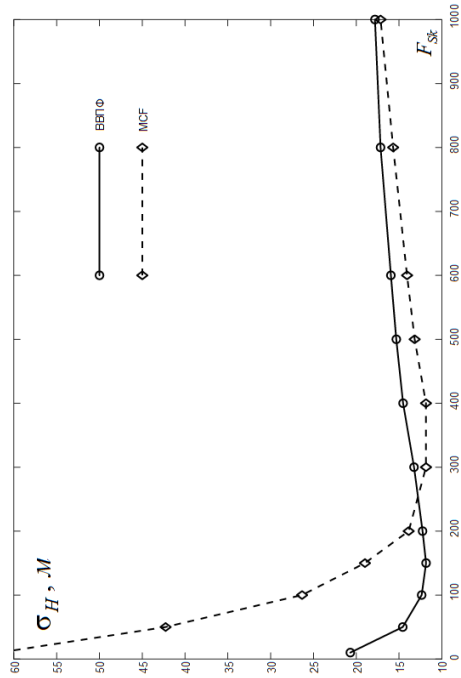


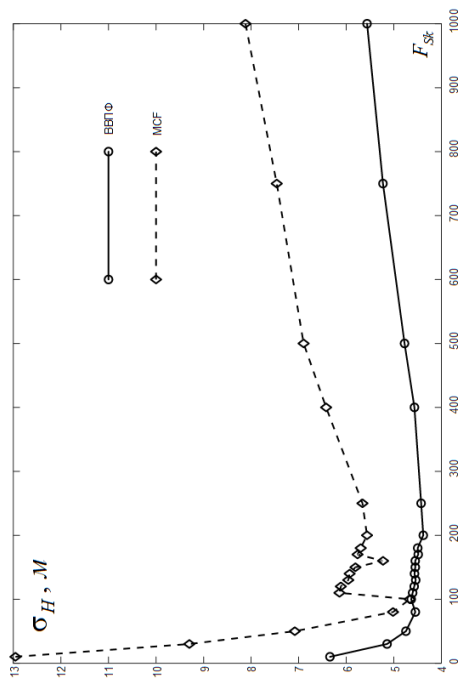
Рис. 4.10: Характеристики точности восстановления высоты для различных алгоритмов развёртывания фазы: А) интерферограмма № 1 ( $c_A \times c_R = 8 \times 2$ ); Б) интерферограмма № 2 ( $c_A \times c_R = 8 \times 2$ ); В) интерферограмма № 3 ( $c_A \times c_R = 8 \times 4$ ); Г) интерферограмма № 5 ( $c_A \times c_R = 8 \times 4$ )



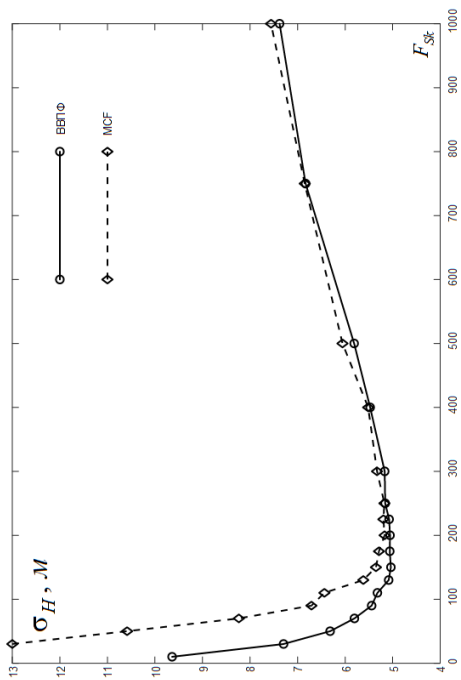
Б



Г



А



В

Рис. 4.11: Характеристики точности восстановления высоты для различных алгоритмов развёртывания фазы: А) интерферограмма № 1 ( $c_A \times c_R = 4 \times 1$ ); Б) интерферограмма № 2 ( $c_A \times c_R = 4 \times 1$ ); В) интерферограмма № 3 ( $c_A \times c_R = 4 \times 2$ ); Г) интерферограмма № 5 ( $c_A \times c_R = 4 \times 2$ )

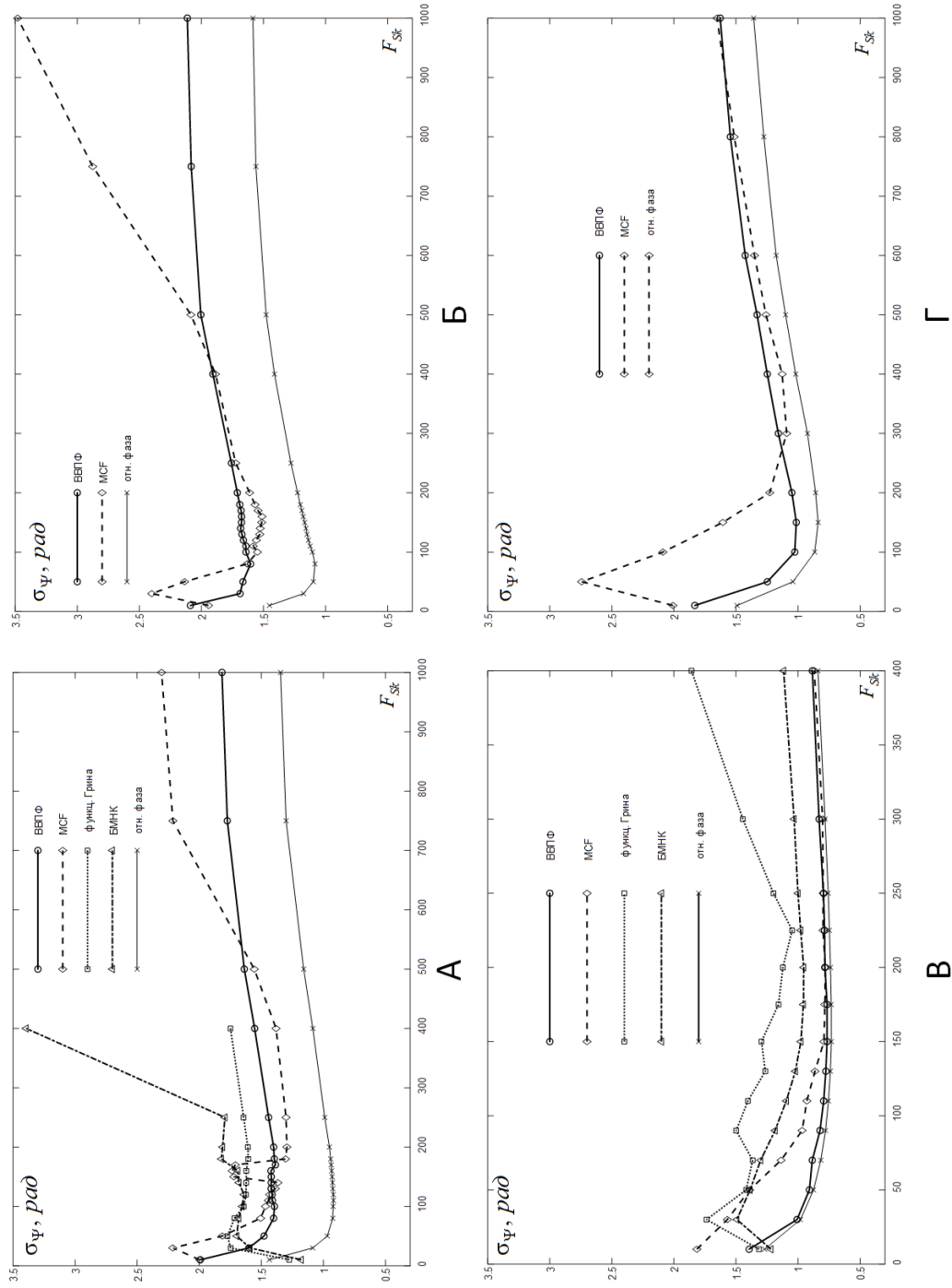


Рис. 4.12: Характеристики точности восстановления абсолютной фазы для различных алгоритмов: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 2; В) интерферограмма № 3; Г) интерферограмма № 5

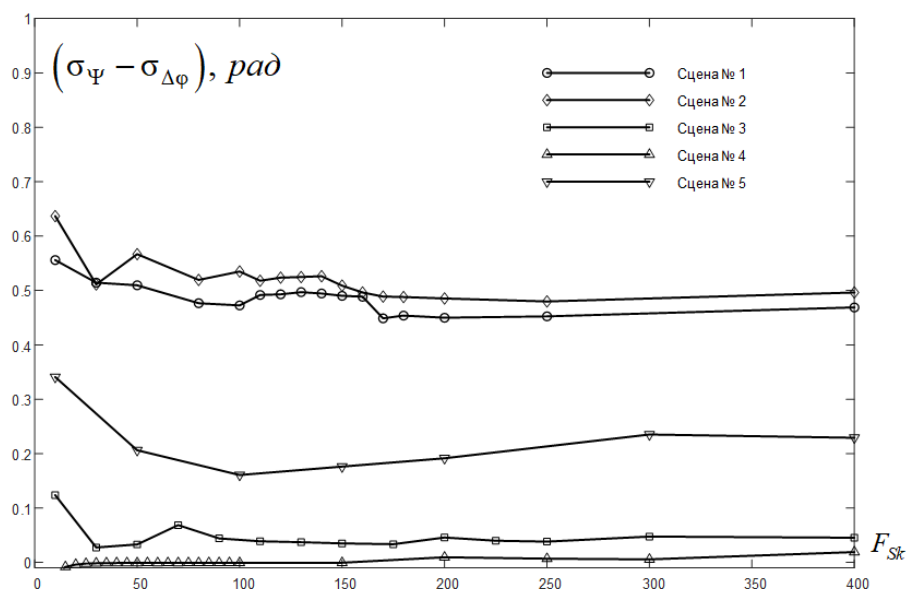


Рис. 4.13: Разности между относительными фазами и восстановленными абсолютными фазами (алгоритм ВВПФ) для всех интерферограмм

#### 4.4 Сравнение способов оценивания когерентности интерферометрических пар

Сравнение производится для следующих оценок когерентности:

- стандартной оценки когерентности по соотношению (1.25) (далее — оценка  $\hat{\rho}_{1,m,n}$ );
- модифицированная оценка когерентности  $\hat{\rho}_{1,m,n}$ , в которой дополнительно осуществляется демодуляция пространственной частоты для подавления влияния топографической составляющей фазы [101, 152]:

$$\begin{aligned}
 [\omega_{0m}, \omega_{0n}] &= \underset{m,n}{\operatorname{argmax}} \{ \mathfrak{F}[\dot{Z}_{1,m,n} \dot{Z}_{2,m,n}^*] \}, \\
 \hat{\rho}_{2,m,n} &= \frac{\left| \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} \dot{Z}_{1,m,n} \dot{Z}_{2,m,n}^* \exp \left[ -\frac{j\omega_{0m}m}{2M_0+1} - j\frac{\omega_{0n}n}{2N_0+1} \right] \right|}{\sqrt{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{1,m,n}|^2 \times \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{2,m,n}|^2}}, \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

где  $\omega_{0m}, \omega_{0n}$  — пространственные частоты фрагмента интерферограммы размером  $(2M_0 + 1) \times (2N_0 + 1)$ ;

- оценка когерентности, не учитывающая амплитудные составляющие КРЛИ, но ис-



пользующая демодуляцию пространственной частоты [152]:

$$\hat{\rho}_{3,m,n} = \frac{\left| \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} \exp[j\Delta\varphi_{m,n}] \exp \left[ -\frac{j\omega_{0m}m}{2M_0+1} - j\frac{\omega_{0n}n}{2N_0+1} \right] \right|}{(2M_0+1)(2N_0+1)}, \quad (4.2)$$

– оценка когерентности, не учитывающая амплитудные составляющие КРЛИ и не использующая демодуляцию пространственной частоты [152, 153]:

$$\hat{\rho}_{4,m,n} = \frac{\left| \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} \exp[j\Delta\varphi_{m,n}] \right|}{(2M_0+1)(2N_0+1)}. \quad (4.3)$$

При экспериментальном исследовании использовались все 5 интерферограмм, перед вычислением карт когерентности производилось накопление с коэффициентом  $8 \times 2$  для интерферограмм №№ 1 и 2 (общий коэффициент накопления  $c_{1,2}$  с учётом того, что в радиолокаторе используется зондирующий ЛЧМ-сигнал, равен 16) и с коэффициентом  $8 \times 4$  ( $c_{3,4,5} = 32$ ) — для интерферограмм №№ 3–5. Результаты построения характеристик  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  при вычисления по массиву эталонных отметок высот и по интерферограмме фазового шума приведены на рисунках 4.14 и 4.15, соответственно. При вычислениях по массиву эталонных отметок высот диапазон значений когерентности разбивался на 5 интервалов ( $\delta\rho_l = 0.2$ ), при вычислениях по интерферограмме фазового шума — на 20 интервалов ( $\delta\rho_l = 0.05$ ).

Вид характеристик, полученных при вычислениях по массиву эталонных отметок высот (рис. 4.14) указывает, что с.к.о. фазы  $\sigma_{\Delta\varphi}$  в среднем снижается по мере возрастания величины когерентности, однако сами значения с.к.о. значительно (на несколько десятых долей радиана) превосходят теоретически предсказанные значения (1.27), что может быть связано с недостаточной размерностью массива эталонных отметок для расчёта статистик (для интерферограмм №№ 1 и 2 в массивах не оказалось эталонных отметок для расчёта оценок  $\hat{\rho}_{1,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{2,m,n}$  при  $\hat{\rho} > 0,6$ ). При этом выявлено схожее поведение характеристик для оценок  $\hat{\rho}_{1,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{2,m,n}$  с одной стороны, и оценок  $\hat{\rho}_{3,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{4,m,n}$  — с другой, что может свидетельствовать о слабом влиянии топографической составляющей интерферометрической фазы на величины оценок и отсутствии необходимости в вычислительно ёмкой процедуре демодуляции пространственной частоты.

Вид характеристик, полученных при вычислениях по интерферограмме фазового шу-

ма (рис. 4.15), напротив, показывает удовлетворительное соответствие форме теоретической характеристики (1.27) при  $c \approx 2$ . Отличие коэффициентов накопления  $c_{1,2}$  и  $c_{3,4,5}$  от параметра теоретической характеристики  $c$  обусловлено тем, что в (1.27) предполагается статистическая независимость накапливаемых элементов, в то время как у реальных интерферограмм радиус корреляции фазового шума может составлять несколько (5..10) элементов.

Схожесть поведения характеристик для оценок  $\hat{\rho}_{1,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{2,m,n}$  с одной стороны, и оценок  $\hat{\rho}_{3,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{4,m,n}$  — с другой, сохраняется, при этом оценки  $\hat{\rho}_{1,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{2,m,n}$  существенно отклоняются от формы теоретической характеристики при высоких ( $\rho > 0.6$ ) значениях когерентности, что вызвано действием «бликов» размером  $(2M_0 + 1) \times (2N_0 + 1)$  на картах когерентности в окрестностях блестящих точек [152]. Таким образом, с использованием методики раздела 3.5 настоящей работы можно сделать вывод, что оценки  $\hat{\rho}_{3,m,n}$  и  $\hat{\rho}_{4,m,n}$  позволяют точнее предсказывать снижение точности восстановленной абсолютной фазы под действием фазового шума. При этом оценка  $\hat{\rho}_{4,m,n}$  позволяет обладает наименьшей вычислительной сложностью среди всех рассмотренных оценок и наиболее предпочтительна для анализа когерентности интерферометрических пар.

#### 4.5 Оценивание эффективности подавления фазового шума

Для оценивания эффективности применения различных способов подавления фазового шума вновь использована методика, описанная в разделе 3.4 настоящей работы. Сначала было исследовано влияние выбора частоты  $F_S^*$ , используемой на шаге 5 методики, на вид характеристик точности относительной фазы. Результат исследования на примере интерферограммы № 1 и гауссового фильтра фазового шума представлен на рисунке 4.16. Из исследования можно сделать вывод, что выбор этой частоты слабо влияет на форму характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(k)}(p_k^F)$ : положение минимума не зависит от выбора частоты  $F_S^*$ , величина минимума варьируется в пределах 0,05 рад, а наименьшее значение  $\sigma_{\Delta\varphi}^{(k)}(p_k^F)$  получается в случае, когда фильтрация фазового шума не используется.

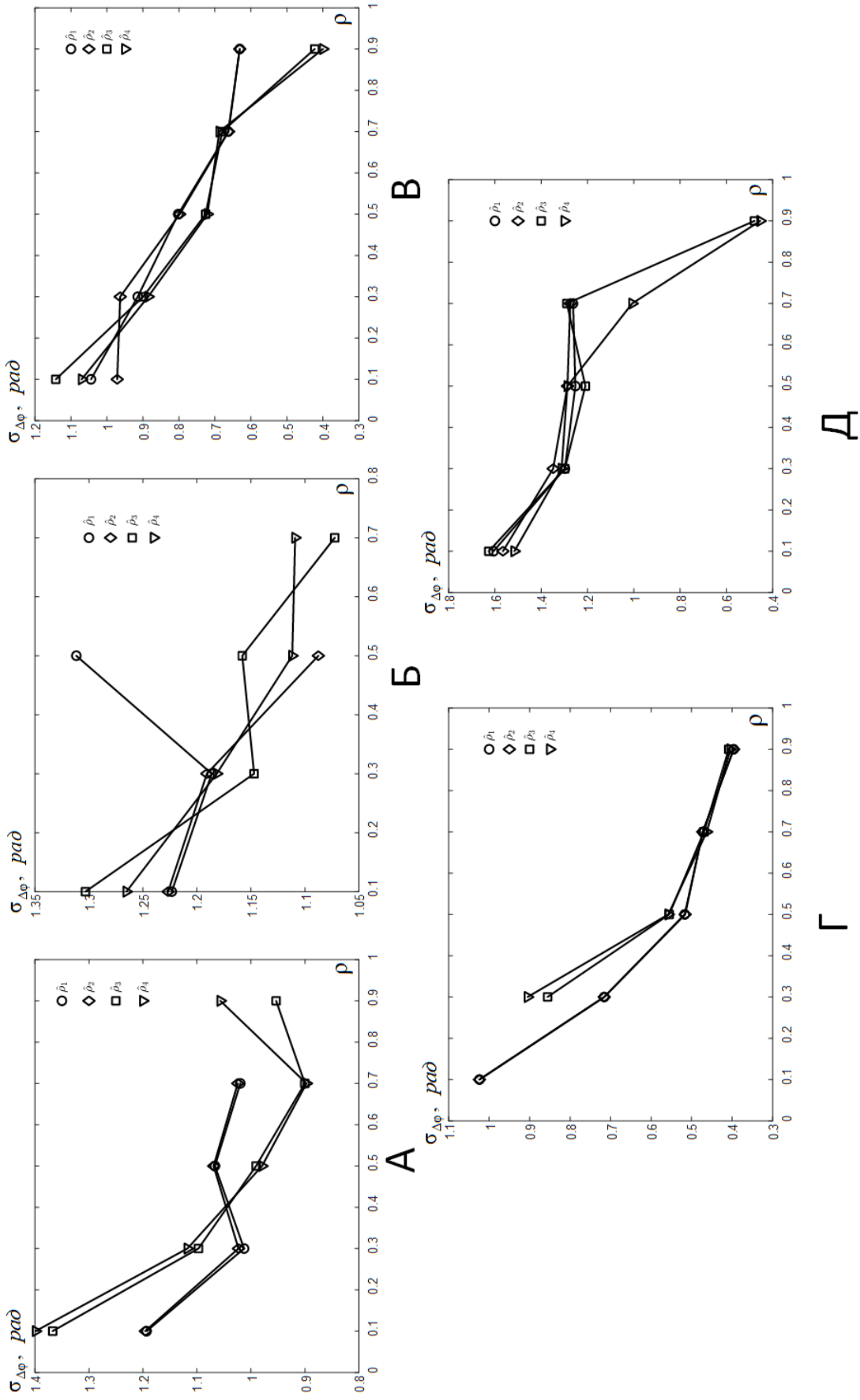


Рис. 4.14: Характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  различных оценок когерентности, вычисленные по массиву эталонных отмоетк высот: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 2; В) интерферограмма № 3; Г) интерферограмма № 4; Д) интерферограмма № 5

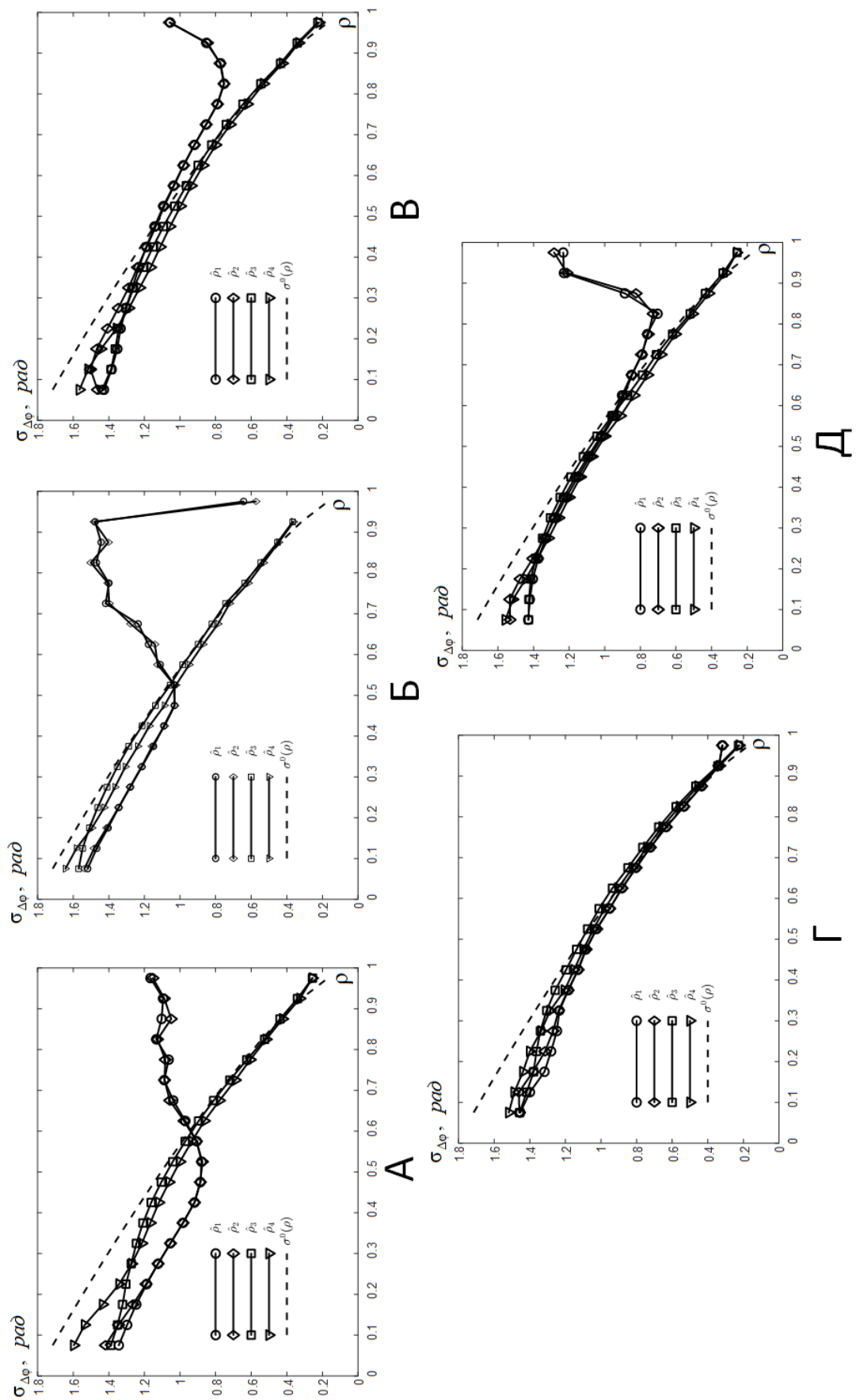


Рис. 4.15: Характеристики  $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$  различных оценок когерентности, вычисленные по интерферограммам фазового шума: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 2; В) интерферограмма № 3; Г) интерферограмма № 4; Д) интерферограмма № 5

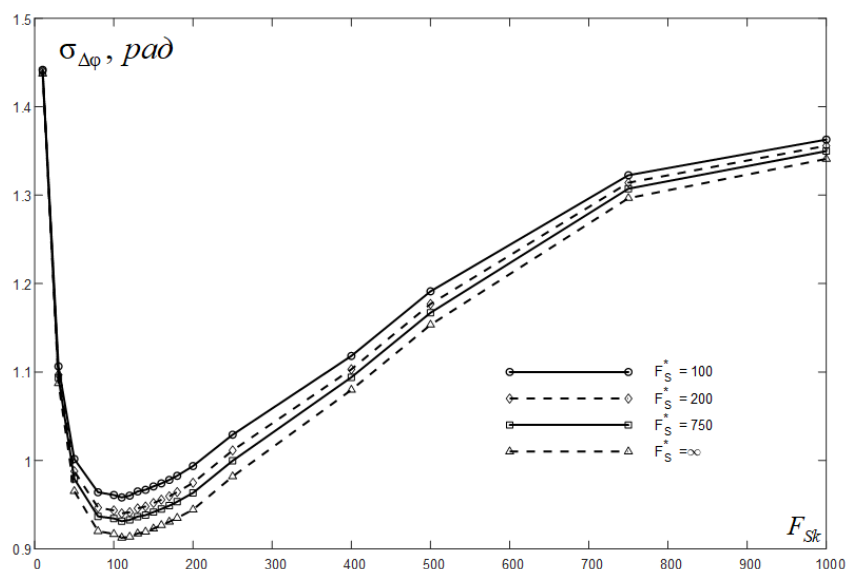


Рис. 4.16: Характеристики эффективности подавления фазового шума (гауссовый фильтр) при различных значениях частоты  $F_S^*$ , используемой на шаге 5 методики оценивания, интерферограмма № 1

В соответствии с предложенной методикой исследовалась эффективность трёх фильтров фазового шума:

- усредняющего фильтра с квадратным окном (при построении характеристик точности варьировался размер окна);
- гауссового фильтра с АЧХ вида (1.21) (при построении характеристик точности варьировалась частота среза АЧХ  $F_{Sk}$ );
- адаптивного частотного фильтра Голдштейна (1.20) с размером окна фильтрации АЧХ  $5 \times 5$  (при построении характеристик точности варьировались размер блока фильтра и коэффициент адаптации).

Семейства характеристик точности относительной фазы для интерферограмм №№ 1, 2 и 5 при различных коэффициентах накопления элементов интерферограммы (для фильтра Голдштейна — при различных значениях коэффициента адаптации) представлены на рисунках 4.17–4.19. Из характеристик можно сделать следующие выводы об эффективности накопления элементов интерферограммы и фильтров фазового шума:

1. Минимально достижимые значения с.к.о. относительной фазы примерно одинаковые для всех фильтров (не более 0,05 рад);
2. Для усредняющего фильтра положение минимума характеристики зависит от величины коэффициента некогерентного накопления и обратно пропорционально ему, при этом при увеличении коэффициента характеристика «сужается», что затрудняет выбор

оптимального размера окна;

3. Для гауссового фильтра положение минимума характеристики не зависит от величины коэффициента накопления, при этом величина минимума также слабо зависит от величин коэффициентов (при сохранении пропорциональности между ними);

4. Для фильтра Голдштейна вид характеристики существенно зависит от величины коэффициента адаптации: при малых значениях (1,0–1,5) ход характеристики более пологий, при этом значения ошибки, близкие к минимальным, не всегда достигаются (интерферограммы №№ 3 и 5). При больших значениях коэффициента адаптации достигаются наименьшие значения с.к.о. относительной фазы, по диапазон значений размера блока фильтра в окрестности минимума невелик и сужается с ростом коэффициента.

Таким образом, можно сделать вывод, что гауссовый фильтр оказался наиболее эффективным для подавления фазового шума: минимально достижимые значения с.к.о. относительной фазы для него получаются такими же, как и для остальных фильтров, рост характеристики при превышении оптимального значения частоты среза  $F_{Sk}$  достаточно медленный, само минимальное значение с.к.о. не зависит от величины коэффициента накопления элементов интерферограммы. Эти обстоятельства упрощают выбор оптимального значения  $F_{Sk}$  для разных интерферограмм с наперёд неизвестными характеристиками рельефа и других свойств местности. Кроме того, вычислительная эффективность гауссового фильтра, действующего в частотной области, довольно высока за счёт использования алгоритмов двумерного БПФ и, в отличие от усредняющего фильтра и фильтра Голдштейна, не зависит от параметра фильтра (частоты  $F_{Sk}$ ).

С использованием этой же методики произведено исследование точности интерферометрической фазы при использовании и при отказе от использования амплитудной информации КРЛИ при интерферометрической обработке (межэлементном некогерентном накоплении и фильтрации фазового шума). На рисунке 4.20 представлены характеристики точности интерферометрической фазы для сцен №№ 1 и 3, полученных для обоих случаев. Из графиков можно сделать вывод, что отказ от использования амплитудной информации привёл к увеличению точности интерферометрической фазы после подавления фазового шума — на 15% для сцены № 1 и на 5% для сцены № 3.

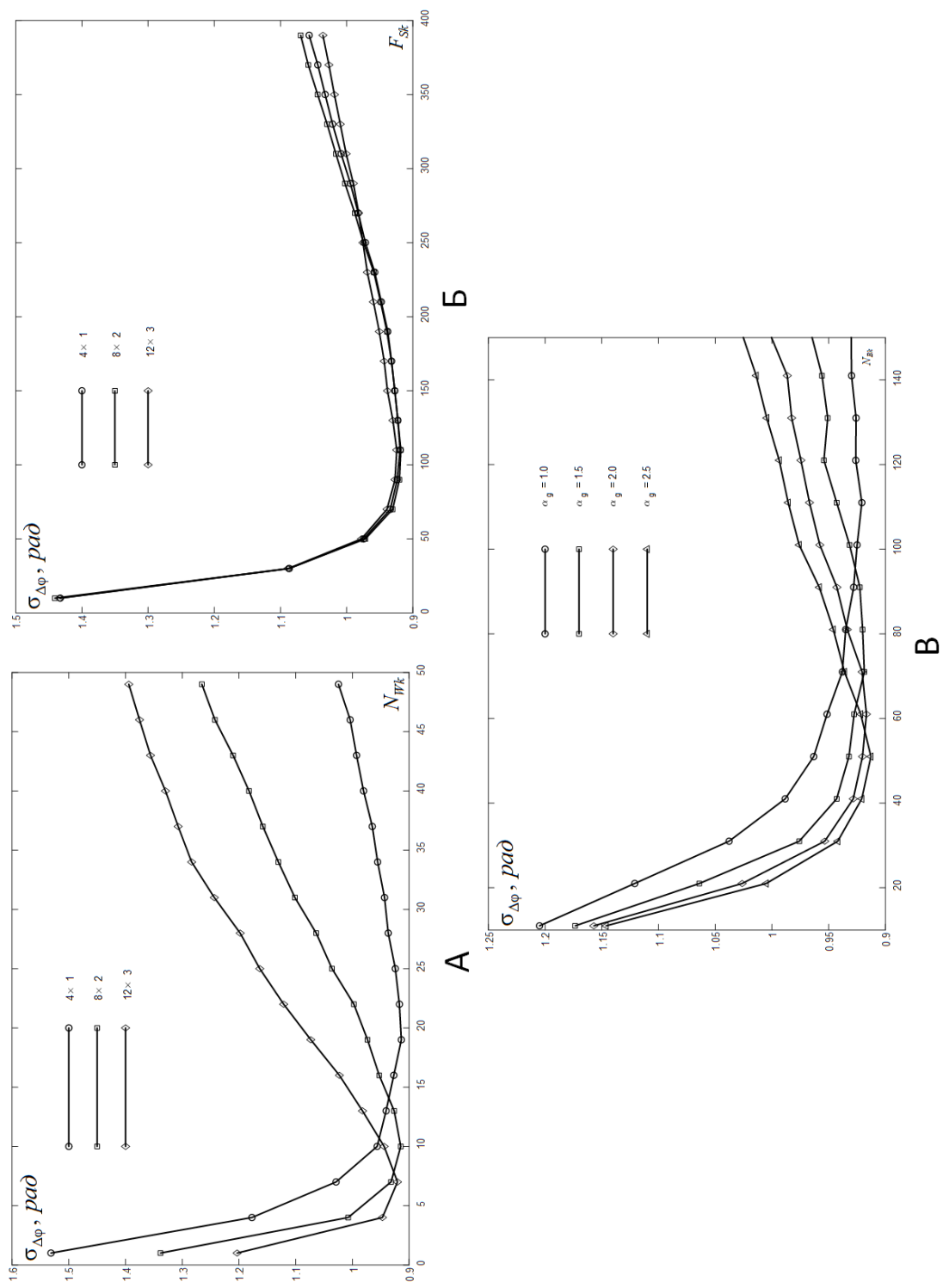
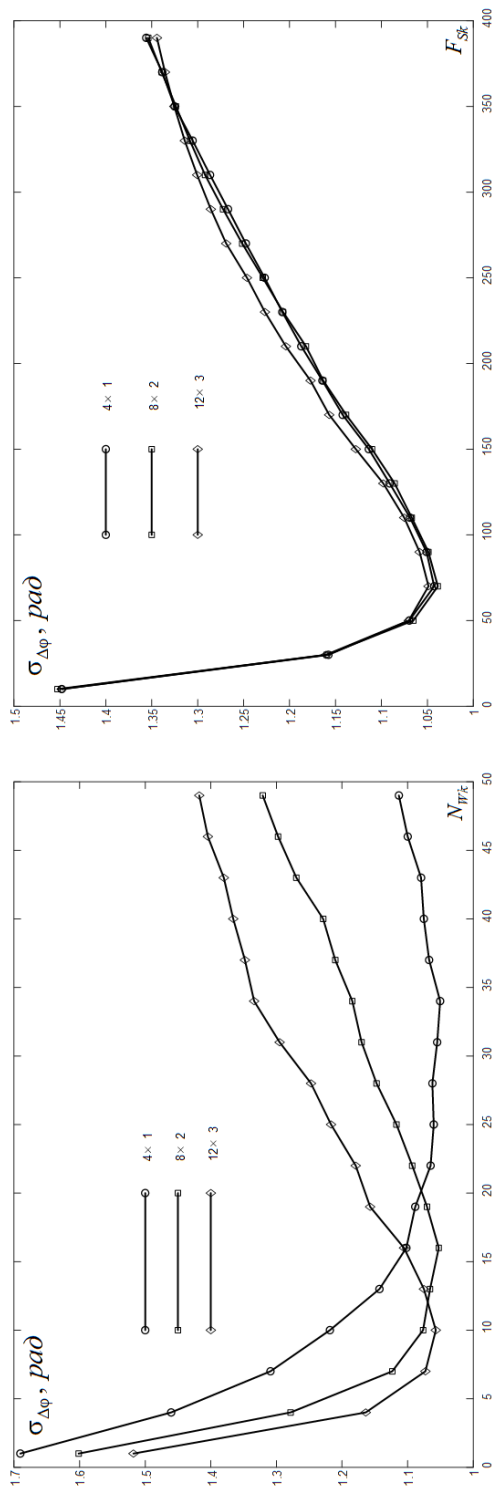
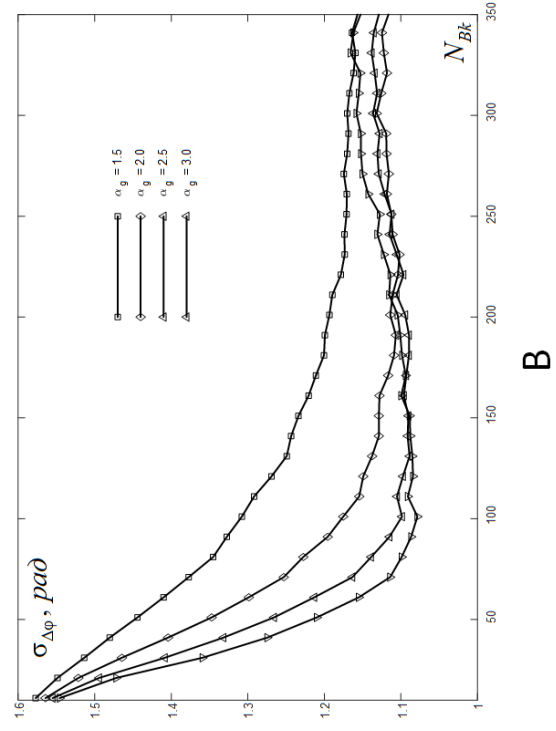


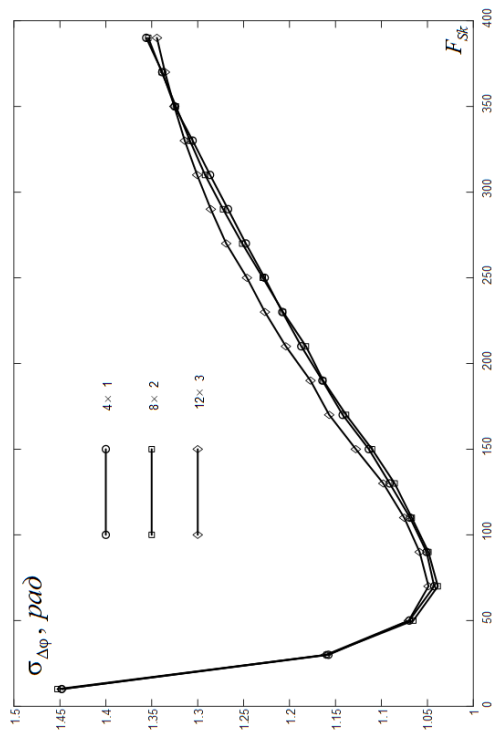
Рис. 4.17: Характеристики точности относительной фазы для интерферограммы № 1: А) усредняющий фильтр; Б) гауссовый фильтр; В) фильтр Голдштейна



А



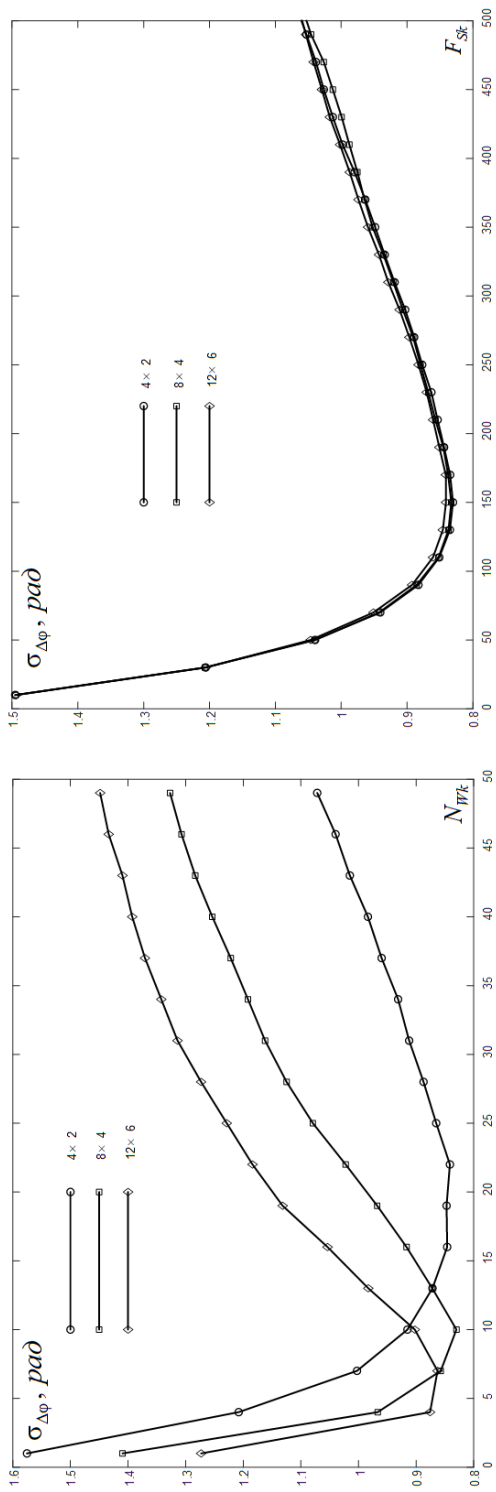
В



Б

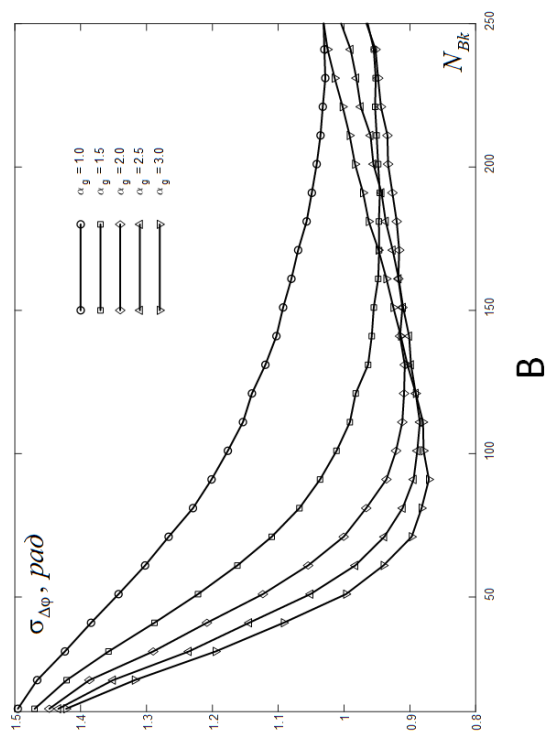
Рис. 4.18: Характеристики точности относительной фазы для интерферограммы № 3: А) усредняющий фильтр; Б) гауссовый фильтр; В) фильтр Голдштейна





А

Б



В

Рис. 4.19: Характеристики точности относительной фазы для интерферограммы № 5: А) усредняющий фильтр; Б) гауссовый фильтр; В) фильтр Голдштейна

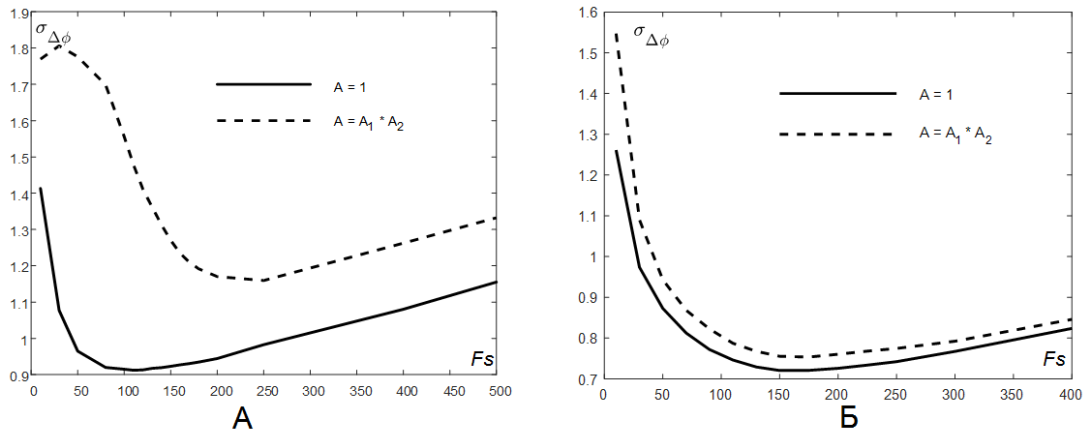


Рис. 4.20: Характеристики точности интерферометрической фазы при использовании (« $A = A_1 A_2$ ») и без использования (« $A = 1$ ») амплитудной информации КРЛИ: А) интерферограмма № 1; Б) интерферограмма № 3

#### 4.6 Выводы по главе 4

4.1. Показано, что алгоритм выравнивания встречного вихревого поля фазы в рекурсивной реализации с применением пост-фильтрации остаточной интерферограммы обеспечивает точность восстановления абсолютной фазы, сопоставимую с точностью, получаемой методом минимальной стоимости потока (с различием на 5–8%), а для интерферограмм большого размера может обеспечивать точность на 20–25% лучше, чем алгоритм MCF.

4.2. Показано, что изменение последовательности интерферометрической обработки, заключающееся в развёртывании фазы методом выравнивания встречного вихревого поля фазы сразу после этапа некогерентного накопления и уже последующей фильтрацией фазового шума, расширяет диапазон значений частоты среза АЧХ фильтра фазового шума, при которых достигается наилучшая точность восстановления фазы, что упрощает выбор её значения для сцен с наперёд неизвестными характеристиками сигнала и местности.

4.3. Наилучшая точность цифровых моделей рельефа, полученных при интерферометрической обработке сцен ALOS PALSAR, составила от 4,1 м для сцен с холмистым рельефом до 12,0 м — для сцен с низкорным рельефом.

4.4. С использованием методики сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар показано, что оценка когерентности, не учитывающая амплитуды комплексных радиолокационных изображений, позволяет точнее других оценок пред-

сказывать величину снижения точности восстановленной абсолютной фазы при воздействии фазового шума, а характеристика зависимости среднеквадратичного отклонения фазового шума от величины такой оценки для интерферограмм радиолокатора ALOS PALSAR с удовлетворительной точностью совпадает с теоретически рассчитанной характеристикой.

4.5. С использованием методики оценивания эффективности подавления фазового шума показано, что разные фильтры фазового шума (усредняющий фильтр, гауссовый фильтр, фильтр Голдштейна) обеспечивают примерно одинаковую точность относительной фазы сглаженной интерферограммы. В этом случае гауссовый фильтр оказывается предпочтительным из-за высокой скорости работы (при реализации в частотной области с использованием БПФ) и малой зависимости точности восстановления фазы от размера интерферограммы. Также показано, что при использовании гауссового фильтра фазового шума изменение коэффициентов межэлементного некогерентного накопления (при сохранении пропорциональности между ними) практически не влияет на точность получаемого результата, но позволяет сократить объём вычислений при интерферометрической обработке.

## 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 значений 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 дополнительных 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 оценивания точности результатов интерферометриче-

ской 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.

**Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.** В результате проведенных в диссертационной работе исследований по анализу и усовершенствованию алгоритмов и технологий интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли решены актуальные научно-технические задачи по повышению эффективности построению карт высот земной поверхности. 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 точности 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.

## Литература

- [1] **Rodriguez, E.** An Assessment of the SRTM Topographic Products [Электронный ресурс] / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley. // NASA JPL. 2005. 143 p. Режим доступа: [https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_D31639.pdf](https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf) (дата обращения: 20.11.2022).
- [2] WorldDEM Technical Product Specification. Version 2.6 // Airbus Defence and Space Intelligence [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/WorldDEM-Technical-Specification.pdf> (дата обращения: 06.08.2022).
- [3] **Сосновский, А.В.** Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Труды СПИИРАН. 2013. № 5(28). С. 194–208.
- [4] **Костюк, Е.А.** Возможности космической радиолокационной интерферометрии и ее перспективы в России / Е.А. Костюк, П.В. Денисов, Л.А. Бадак, А.И. Захаров // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2019. № 1. С. 42–48.
- [5] **Котельников, В.А.** Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе / В.А. Котельников, О.Н. Ржига, Ю.Н. Александров, В.М. Дубровин, В.А. Морозов, Г.М. Петров, А.М. Шаховской, А.В. Францессон // Проблемы современной радиотехники и электроники — М.: Наука, 1980. С. 246–277.
- [6] **Александров, Ю.Н.** Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г. [Текст] / Ю.Н. Александров, А.С. Вышлов, В.М. Дубровин, А.Л. Зайцев, С.П. Игнатов, В.И. Каевицер, В.А. Котельников, А.А. Крымов, Г.М. Петров, О.Н. Ржига, А.Т. Тагаевский, А.Ф. Хасянов, А.М. Шаховской // Докл. АН СССР. 1980. Т. 6. С. 1334–1338.
- [7] **Елизаветин, И.В.** Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического РСА [Текст] / И.В. Елизаветин, Е.А. Ксенофонов // Исследования Земли из космоса. — 1996. — № 1. С. 75-90.

- [8] **Захаров, А.И.** Методы дистанционного зондирования Земли радарными с синтезированной апертурой: дисс. ... д-ра. физ.-мат. наук: 01.04.03. — Фрязино, 2012. — 370 с.
- [9] **Захаров, А.И.** Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и её перспективы в рамках проекта «КОНДОР-ФКА» / А.И. Захаров, Е.А. Костюк, П.В. Денисов, Л.А. Бадак // ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. 2019. № 1. DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.2.
- [10] **Баскаков, А.И.** Точностные характеристики космического радиотехнического комплекса дистанционного зондирования для восстановления рельефа поверхности Земли: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.12.17. — Москва, 1997. — 461 с.
- [11] **Баскаков, А.И.** Влияние параметров системы на выбор угла визирования для интерферометрического РСА с «жесткой» базой / А.Э. Сажнева, А.И. Баскаков // Исследование Земли из космоса. 2001. № 1. С. 40–45.
- [12] **Баскаков, А.И.** Анализ влияния фазовых шумов на точностные характеристики интерферометрических РСА с «жесткой» базой / А.И. Баскаков, Ка Мин Хо // Исследование Земли из космоса. 1998. № 2. С. 43–50.
- [13] **Баскаков, А.И.** Исследование потенциальной точности определения местного рельефа авиационным интерферометрическим РСА при переднебоковом обзоре / А.И. Баскаков, П.Е. Шимкин // Радиотехника. 2013. № 10. С. 71–76.
- [14] **Шимкин, П.Е.** Однопроходный бортовой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой антенны переднебокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.14. — Москва, 2018. — 142 с.
- [15] **Mikhailov, V.O.** Satellite Radar Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas and Displacements of Natural and Man-Made Objects / V.O. Mikhailov, E.A. Kiseleva, E.I. Smol'yaninova, P.N. Dmitriev, V.I. Golubev, E.P. Timoshkina, S.A. Khairtdinov // Seism. Instr. 2018. № 5. P. 515–520.



- [16] **Дмитриев, П.Н.** Новые методы обработки и интерпретации данных радарной спутниковой интерферометрии: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.10. — Москва, 2013 — 124 с.
- [17] **Волкова, М.С.** Применение спутниковой радарной интерферометрии для изучения и моделирования полей смещений на склонах вулканов полуострова Камчатка: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.10. — Москва, 2022. — 97 с.
- [18] **Бабокин, М.И.** Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА / М.И. Бабокин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 65–72.
- [19] **Бабокин, М.И.** Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА / М.И. Бабокин // Радиотехника. 2009. № 7. С. 59–64.
- [20] **Бабокин, М.И.** Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.12.14. — Москва, 2010. — 335 с.
- [21] **Верба, В.С.** Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. М.: Радиотехника. 2010. 680 с.
- [22] Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В.Ф. Кравченко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 544 с.
- [23] **Кутуза, Б.Г.** Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности / Б.Г. Кутуза, М.В. Данилычев, О.И. Яковлев. — Москва: ЛЕНАНД, 2016. — 336 с.
- [24] **Горячкин, О.В.** Оценка погрешности измерения высоты рельефа местности бистатической радиолокационной системой космического базирования / О.В. Горячкин, И.В. Маслов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2019. — Т. 62, № 5. — С. 477-483.
- [25] **Купряшкин, И.Ф.** Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех : монография / И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев. — Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. — 460 с.

- [26] **Феоктистов, А.А.** Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов / А.А. Феоктистов, А.И. Захаров, П.В. Денисов, М.А. Гусев // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т.9. № 2. С. 106–110.
- [27] **Феоктистов, А.А.** Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 4. Основные направления развития метода постоянных рассеивателей; Ключевые моменты методов SQUEESAR и STAMPS // А.А. Феоктистов, А.И. Захаров, П.В. Денисов, М.А. Гусев. Журнал радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 1–22.
- [28] **Сидоров, А.А.** Исследование характеристик алгоритмов устранения эффекта миграции сигнала в каналах дальности для РСА бокового обзора / А.А. Сидоров, В.В. Костров // Радиопромышленность. — 2012. — № 2. — С. 97-104.
- [29] **Костров, В.В.** Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения / В.В. Костров, Е.Ф. Толстов // VII Всероссийский Армандовские чтения: Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром. МИ ВлГУ. — 2017. С. 76–113.
- [30] **Joughin, I.R.** Synthetic Aperture Radar Interferometry / I.R. Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodrigues, R.M. Goldstein et al. // IEEE Proc. 2000. Vol. 88. № 3. P. 33–82.
- [31] **Rodrigues, E.** Theory and design of interferometric synthetic aperture radars / E. Rodrigues, J.M. Martin // IEE Proceedings-F. 1992. Vol. 139. № 2. P. 147–159.
- [32] **Bamler, R.** Synthetic aperture radar interferometry / R. Bamler, P. Hartl // Inverse Problems. 1998. Vol. 14. № 4. P. r1–r54.
- [33] **Just, D.** Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar / D. Just, R. Bamler // Applied Optics. Vol 33. 1994. P. 4361–4368.
- [34] **Hanssen, R.F.** Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. — Dordrecht; Boston: Kluwer academic publishers. — 2002. — 308 p.
- [35] **Ferretti, A.** Permanent scatterers in SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. № 1. P. 8–20.

- [36] **Madsen, S.N.** Topographic mapping using radar interferometry: Processing techniques / S.N. Madsen, H.A. Zebker, J. Martin // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1993. Vol. 31. P.246–256.
- [37] **Madsen S.N.** On absolute phases determination techniques in SAR interferometry / S.N. Madsen // Proc. SPIE Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II, Orlando, FL, Apr. 19–21, 1995. Vol. 2487. P. 393–401.
- [38] **Шувалов, Р.И.** Математическое моделирование фазового градиента для задачи развертки фазы в космической радиолокационной топографической интерферометрии: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. — Москва, 2011. — 207 с.
- [39] **Шувалов, Р.И.** Алгоритм метода функций Грина для задачи развертки фазы на плоскости / Р.И. Шувалов. Горные науки и технологии. 2011. № 2. С. 101-113.
- [40] **Шувалов, Р.И.** Развертка фазы радиолокационных топографических интерферограмм / Р.И. Шувалов. Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 7. С. 9.
- [41] **Егошкин Н.А.** Методы высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.13.01. — Рязань, 2019. — 323 с.
- [42] **Филатов, А.В.** Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. — Барнаул, 2009. — 180 с.
- [43] **Goldstein, R.M.** Radar observations of Mars / R.M. Goldstein, W.F. Gillmore // Science. 1963. Vol. 141(3586). P. 1171–1172.
- [44] **Carpenter, R.L.** Radar observations of Mercury / R.L. Carpenter, R.M. Goldstein // Science. 1963. Vol. 142(3590). P. 381–382.
- [45] **Goldstein, R.M.** Radar observations of Jupiter / R.M. Goldstein // Science. 1964. Vol. 144(3620). P. 842–843.
- [46] **Goldstein, R.M.** Radar Investigations of the Planets / R.M. Goldstein // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1964. № AP-12(7). P. 865-872.

- [47] **Zebker, H.A.** Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations / H.A. Zebker, R.M. Goldstein // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. №. B5. P. 4993–4999.
- [48] **Gabriel, A.K.** Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B / A.K. Gabriel, R.M. Goldstein // *International Journal of Remote Sensing.* 1988. Vol. 9. № 5. P. 857–872.
- [49] **Li, F.K.** Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars / F.K. Li, R.M. Goldstein // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1990. Vol. 28. № 1. P. 88–97.
- [50] **Goldstein, R.M.** Remote sensing of ocean currents / R.M. Goldstein, T.P. Barnett, H.A. Zebker // *Science.* 1989. № 246(4935). P. 1282-1285.
- [51] **Gabriel, A.K.** Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry / A.K. Gabriel, R.M. Goldstein, H.A. Zebker // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94(B7). P. 9183-9191.
- [52] **Goldstein, R.M.** Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping / R.M. Goldstein, H.A. Zebker, C.L. Werner // *Radio Science.* 1988. Vol. 23. № 4. P. 713–720.
- [53] **Zebker, H.A.** Decorrelation in Interferometric Radar Echoes / H.A. Zebker, J. Villasenor // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1992. P. 950–959.
- [54] **Van Zyl, J.J.** Imaging Radar Polarization Signatures: Theory and Application / J.J. Van Zyl, H. Zebker, C. Elachi // *Radio Science.* 1987. Vol. 22. № 4. P. 529–543.
- [55] **Chen, C.W.** Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms / C.W. Chen, H.A. Zebker // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision.* 2000. Vol. 17. № 3. P. 401–414.
- [56] **Constantini, M.** A novel phase unwrapping method based on network programming / M. Constantini // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1998. Vol. 36. № 3. P. 813–821.
- [57] **Fornaro, G.** Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation / G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1996. Vol. 34. № 3. P. 720–727.

- [58] **Sansosti, E.** Geometrical SAR Image Registration / E. Sansosti, P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, G. Fornaro // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. № 10. P. 2861–2870.
- [59] **Chen, C.W.** Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry / C.W. Chen // A dissertation... doctor of philosophy [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://web.stanford.edu/group/radar/people/Curtis\\_thesis\\_cpdf\\_print.pdf](https://web.stanford.edu/group/radar/people/Curtis_thesis_cpdf_print.pdf) (дата обращения: 20.11.2022).
- [60] **Tomioka, S.** Phase unwrapping for noisy phase maps using rotational compensator with virtual singular points / S. Tomioka, S. Heshmat, N. Miyamoto, S. Nishiyama // Appl. Opt. 2010. № 49. P. 4735–4745.
- [61] **Heshmat, S.** Performance Evaluation of Phase Unwrapping Algorithms for Noisy Phase Measurements / S. Heshmat, S. Tomioka, S. Nishiyama // International Journal of Optomechatronics. 2014. № 8(4). P. 260-274.
- [62] **Tomioka, S.** Three-dimensional gas temperature measurements by computed tomography with incident angle variable interferometer / S. Tomioka, S. Nishiyama, S. Heshmat, Y. Hashimoto, K. Kurita // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2015. Vol. 9401, № 94010J.
- [63] **Коберниченко, В.Г.** Обработка данных дистанционного зондирования земли: практические аспекты: учебное пособие / В.Г. Коберниченко, О.Ю. Иванов, С.М. Зраенко, А.В. Сосновский, В.А. Тренихин. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2013. 168 с.
- [64] **Коберниченко, В.Г.** Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования земли: лабораторный практикум: учебное пособие / В.Г. Коберниченко, О.Ю. Иванов, А.В. Сосновский. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2013. 64 с.
- [65] **Сколник, М.И.** Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. Меррилла И. Сколника ; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы. — Москва : Техносфера, 2015. 680 с.

- [66] **Love, A.W.** In Memory of Carl A. Wiley / A.W. Love // IEEE Antennas and Propagation. Vol. 27. № 3. P. 17–18.
- [67] **Реутов, А.П.** Радиолокационные станции бокового обзора / А.П. Реутов, Б.А. Михайлов, Г.С. Кондратенков, Б.В. Бойко ; под ред. А. П. Реутова. — М.: Сов. радио. 1970. — 360 с.
- [68] **Кондратенков, Г.С.** Радиолокационные станции воздушной разведки / А.А. Комаров, Г.С. Кондратенков, Н.Н. Курилов и др.; под ред. Г.С. Кондратенкова. — Москва : Воениздат. 1983. — 152 с.
- [69] **Кондратенков, Г.С.** Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. — Москва : Радиотехника, 2005 (Вологда : ООО ПФ Полиграфист) — 366 с.
- [70] **Салганик, П.О.** К расчету разрешающей способности РЛС по пространственным координатам / П.О. Салганик // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 1974. Вып.1. С. 3–19.
- [71] **Матвеевко, Л.И.** О радиоинтерферометре с большой базой / Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашев, Г.Б. Шоломицкий // Известия вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8., № 4. С. 651–654.
- [72] **Graham, L.C.** Synthetic interferometric radar topographic mapping / L.C. Graham // Proc. IEEE. 1974. Vol. 62. P. 763–768.
- [73] **Shemer, L.** Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current and a monochromatic wave / L. Shemer, E. Kit // J. Geophys. Res. 1991. № 96(C12), P. 22063–22073.
- [74] **Баранов, Ю.Б.** Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR / Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.И. Киселевский, М.А. Болсуновский // Геоматика. 2008. № 1. С. 37–45.
- [75] **Горячкин, О.В.** Экспериментальные результаты многопроходной радиолокационной интерферометрической съёмки, полученные в рамках акции «Самара сквозь облака» / О.В. Горячкин, В.И. Дмитренко, А.А. Харитоновна. // Физика и технические

приложения волновых процессов: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та. 2010. С. 173–174.

- [76] **Евтюшкин, А.В.** Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом SAR-интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS \PALSAR / А.В. Евтюшкин, А.В. Филатов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. № 6. Т.1. С. 46–53.
- [77] **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. Vol. 4. № 2. P. 198–233.
- [78] **Cloude, S.** Polarimetric SAR interferometry / S. Cloude, K. Papathanassiou // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36. № 5(1). P. 1551–1565.
- [79] **Kim, Y.** Overview of Polarimetric Interferometry / Y. Kim, J. Van Zyl // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2000. Vol. 3. P. 231–236.
- [80] **Zhang, Q.** Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique / Q. Zhang, T.S. Yeo // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 9. P. 1818–1828.
- [81] **Ksendzuk, A. V.** Multi-base InSAR with enhanced signal processing / A. V. Ksendzuk, V. K. Volosyuk // IEEE International conference on antenna theory and techniques, Sevastopol, Ukraine, 9-12 Sep., 2003. P. 405–408.
- [82] **Елюшкин В.Г.** Применение топогеодезических данных различного состава для координатной привязки радиолокационных изображений местности / В.Г. Елюшкин, Ю.Е. Рязанцев // Радиоэлектроника и связь. 1991. № 2. С. 76–81.
- [83] **Агапов, С.В.** Фотограмметрия сканерных снимков [Текст] / С.В. Агапов, — М.: Картогеоцентр — Геодезиздат. 1996. — 176 с.
- [84] **Тюфлин, Ю.С.** Преобразование космических радиолокационных изображений к снимкам центрального проектирования / Ю.С. Тюфлин // Геодезия и картография. 1995. № 12. С. 24–28.

- [85] **Антипов, В.Н.** Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др. — М.: Радио и связь, 1988. - 302 с.
- [86] **Школьный, Л.А.** Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / под ред. Л.А. Школьного. — М: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2008. 531 с.
- [87] **Коберниченко, В.Г.** Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / В.Г. Коберниченко. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. — 220 с.
- [88] **Коберниченко, В.Г.** Особенности формирования изображений в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой / В.Г. Коберниченко. — Вестник УГТУ-УПИ. Сер. радиотехн., Теория и практика радиолокации земной поверхности. 2005. № 19(71), С. 43–50.
- [89] **Bisceglie, M.** Stochastic modeling of atmospheric effects in SAR differential interferometry / M. Di Bisceglie, A. Fusco, C. Galdi, E. Sansosti // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01. 2001. Vol. 6. P. 2677–2679.
- [90] **Антонов И. К.** Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Монография / И.К. Антонов, А.Н. Детков, Д.А. Ницак., А.Н. Тонких, О.Е. Цветков. — М.: Радиотехника. 2021. 296 с.
- [91] Описание модуля Photomod RADAR. Описание интерферометрического процессора. Части 1, 2, 3. М.: ЗАО «Ракурс», 2007.
- [92] **Li, Z.** Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection / Z. Li, Z. Bao, Hai Li, G. Liao // IEEE Trans. on Geosc. & Remote Sens. 2006. Vol. 44(2). P. 288–297.
- [93] **Goldstein R.M.** Radar ice motion interferometry / R.M. Goldstein, C.L. Werner // Proc. 3rd ERS Symp. Florence, Italy. 1997. Vol. 2. P. 969–972.
- [94] **Baran, I.** A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter / I. Baran, M.P. Stewart, B.M. Kampes, Z. Perski, P. Lilly // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. № 9. P. 2114–2118.



- [95] **Small, D.** Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models / D. Small, C. Werner, D. Nuesch // *EARSEL Adv. Remote Sens.* 1995. № 4. С. 26–39.
- [96] **Holecz, I.F.** Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data / I.F. Holecz, J.H. Moreira, P. Pasquali, S. Voigt, E. Meier, D. Nuesch // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing — A Scientific Vision for Sustainable Development.* 1997. № 4. P. 1929–1931.
- [97] **Карионов, Ю.И.** Оценка точности матрицы высот SRTM / Ю.И. Карионов // *Геопрофи.* 2010. № 10. С. 48–51.
- [98] **Small, D.** A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry / D. Small, P. Pasquali, S. Fuglistaler // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '96.* 1996 № 1. P. 342–344.
- [99] **Duren, R.** Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar / R. Duren, E. Wong, B. Breckenridge, S. Shaffer // *Proceedings of SPIE.* 1998. Vol. 3365. P. 51–60.
- [100] **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.
- [101] **Touzi, R.** Coherence Estimation for SAR Imagery / R. Touzi, A. Lopes, P.W. Vachon // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing.* 1999. Vol. 37. №1. P. 135–149.
- [102] **Lopez-Martinez, C.** Coherence estimation in synthetic aperture radar data based on speckle noise modelling / C. Lopez-Martinez, E. Pottier // *Applied Optics.* 2007. Vol. 46. № 4. P. 544–558.
- [103] **Richards, M.A.** A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing / M.A. Richards // *IEEE A&E systems magazine.* 2007. Vol. 22. № 9. P. 5–29.
- [104] **Costantini M.** A novel phase unwrapping method based on network programming / M. Costantini // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 1998. № 36. P. 813–821.

- [105] **Aoki, T.** Two-dimensional phase unwrapping by direct elimination of rotational vector fields from phase gradients obtained by heterodyne techniques / T. Aoki, T. Sotomaru, T. Ozawa, T. Komiyama, Y. Miyamoto, M. Takeda // *Opt. Rev.* 1998. № 5. P. 374–379.
- [106] **Yamaki, R.** Singularity-spreading phase unwrapping / R. Yamaki, A. Hirose // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2007. Vol. 45. P. 3240–3251.
- [107] **Tomioka, S.** Weighted denoising for phase unwrapping / S. Tomioka, S. Nishiyama // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* 2014. Vol. 9019, № 90190M.
- [108] **Zhang, L.** Ground deformation mapping by fusion of multi-temporal interferometric synthetic aperture radar images: a review / L. Zhang, X. Ding, Z. Lu // *International Journal of Image and Data Fusion.* 2015. Vol. 6. № 4. P. 289–313.
- [109] **Zuo, C.** Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review / C. Zuo, L. Huang, M. Zhang, Q. Chen, A. Asundi // *Optics and Lasers in Engineering.* 2016. Vol. 85. P. 84–103.
- [110] **Yu, H.** Large-Scale L0-Norm and L1-Norm 2-D Phase Unwrapping / H. Yu, Y. Lan, J. Xu, D. An, H. Lee // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2017. Vol. 55. № 8. P. 4712–4728.
- [111] **Zhao, J.** Elevation extraction and deformation monitoring by multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai / J. Zhao, J. Wu, X. Ding, M. Wang // *Remote Sensing.* 2017. Vol. 9. № 9. P. 897.
- [112] **Ding, Z.** Local Fringe Frequency Estimation Based on Multifrequency InSAR for Phase-Noise Reduction in Highly Sloped Terrain / Z. Ding, Z. Wang, S. Lin, T. Liu, Q. Zhang, T. Long // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2017. Vol. 14. № 9. P. 1527–1531.
- [113] **Jiang, Z.** A Refined Cluster-Analysis-Based Multibaseline Phase-Unwrapping Algorithm / Z. Jiang, J. Wang, Q. Song, Z. Zhou // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2017. Vol. 14. № 9. P. 1565–1569.
- [114] **Sun, Q.** Comparative analysis of gradient-field-based orientation estimation methods and regularized singular-value decomposition for fringe pattern processing / Q. Sun, S. Fu // *Applied Optics.* 2017. Vol. 56. № 27. P. 7708–7717.

- [115] **Wang, M.** Precise and fast phase wraps reduction in fringe projection profilometry / M. Wang, G. Du, C. Zhou, S. Si, Z. Lei, X. Li, Y. Li // *Journal of Modern Optics*. 2017. Vol. 64. № 18. P. 1862–1869.
- [116] **Евтюшкин, А. В.** Мониторинг сезонных деформаций земной поверхности методом радарной интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR ALOS\PALSAR / А.В. Евтюшкин, А.В. Филатов // *Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования: материалы IV Научно-практической конференции, г. Ханты-Мансийск, 2008*. С. 195–201.
- [117] **Егошкин Н.А.** Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин // *Радиотехника*. 2016. № 11. С. 120–127.
- [118] **Yu, H.** Phase Unwrapping in InSAR. A review / H. Yu, Y. Lan, Zh. Yuan, J. Xu, H. Lee // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019. № 7. P. 40–58.
- [119] **Васильев, В. Н.** Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим сигналам / В.Н. Васильев, И.П. Гуров — СПб.: БХВ — Санкт-Петербург. 1998. — 240 с.
- [120] **Tribolet, J.M.** A New Phase Unwrapping Algorithm / J.M. Tribolet // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1977. Vol. 25. № 2. P. 170–177.
- [121] **Fried, D.L.** Least-square fitting a wave-front distortion estimate to an array of phase-difference measurements / D.L. Fried // *J. Opt. Soc. Am.* 1977. № 67. P. 370–375.
- [122] **Bhanu, B.** On the Computation of the Complex Cepstrum / B. Bhanu, J. H. McClellan // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1980. Vol. 28. № 5. P. 583–585.
- [123] **Fowler, M.L.** Phase-Based Frequency Estimation: A Review / M.L. Fowler // *Digital Signal Processing: A Review Journal*. 2002. Vol. 12. № 4. P. 590–615.
- [124] **Ghiglia, D.** Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods / D. Ghiglia, L. Romero // *Journal of The Optical Society of America A*. 1994. Vol. 11. P. 107-117.

- [125] **Karout, S.A.** Two-dimensional phase unwrapping using a hybrid genetic algorithm / S.A. Karout, M.A. Gdeisat, D.R. Burton, M.J. Lalor // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46. P. 730–743.
- [126] **Huntley, J.M.** Progress in phase unwrapping / J.M. Huntley, C.R. Coggrave // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 1998. № 3407. P. 86–93.
- [127] **Захарова, Л.Н.** Методы радиолокационной интерферометрии в исследовании характеристик земных покровов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03. — Фрязино, 2011. — 213 с.
- [128] **Li, Zh.** On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy / Zh. Li // *Photogrammetric Record*. 1988. № 12(72). P. 873–877.
- [129] ИНСТРУКЦИЯ по нивелированию I, II, III и IV классов [Текст]: ГКИНП(ГНТА)-03-010-02. М.: ЦНИИГАИК, 2003.
- [130] **Титаров, П.С.** Характеристики точности координат точек местности — CE и LE / П.С. Титаров // *Геопрофи.* 2010. № 1. С. 52–53.
- [131] **Lee, I.S.** GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs / I.S. Lee, H.-C. Chang, L. Ge // *Journal of Global Positioning Systems*. 2005. № 1–2. P. 82–87.
- [132] **Brown Jr., C.G.** Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data / C.G. Brown Jr., K. Sarabandi, L.E. Pierce // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 43. № 8. P. 1707–1715.
- [133] **Оньков, И.В.** Оценка точности построения ЦМР методом радарной интерферометрии по снимкам ALOS/PALSAR / И.В. Оньков // *Геоматика*. 2012. № 3, С. 35–41.
- [134] **Berry, P.A.M.** Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry / P.A.M. Berry, J.D. Garlick, R.G. Smith // *Remote Sensing of Environment*. 2007. № 1. P. 17–27.
- [135] **Sun, G.** Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter / G. Sun, K.J. Ranson, V.I. Kharuk, K. Kovacs // *Remote Sensing of Environment*. 2003. № 4. P. 401–411.

- [136] **Simard, M.** Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States / M. Simard, M. Neumann, S. Buckley // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS–2016. 2016. P. 3227–3229.
- [137] **Small, D.** Validation of Height Models from ERS Interferometry / D. Small and D. Nüesch // Proc. FRINGE 1996 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://earth.esa.int/eogateway/events/fringe-96-workshop> (дата обращения: 06.12.2021).
- [138] **Детков, А.Н.** Фильтрация фазового шума в комплексной вейвлет-области в РСА с синтезированной интерферометрической базой / А.Н. Детков, В.А. Обьедков // Труды Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского. 2007. Т. 79. № 2. С. 74–76.
- [139] **Lopez-Martinez, C.** SAR Interferometric phase denoising. A new approach based on wavelet transform / C. Lopez-Martínez, X. Fabregas // Proceedings of the SPIE. 2000. № 1. P. 199–210.
- [140] **Sosnovsky, A.** A phase unwrapping algorithm for interferometric phase images / A. Sosnovsky // Communications in Computer and Information Science. 2015. Vol. 542. P. 146–150.
- [141] **Sosnovsky, A.V.** Phase Noise Suppression Efficiency for InSAR Interferograms / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019. 2019. P. 466–468.
- [142] **Sosnovsky, A.V.** An InSAR phase unwrapping algorithm with the phase discontinuity compensation / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2005. P. 127–136.
- [143] **Sosnovsky, A.V.** Modification of Inversed Vortex Phase Field Unwrapping Algorithm for the InSAR Height Measurements / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2020. 2020. Vol. 2425. № 130013.

- [144] **Sosnovsky, A.** Method for Increasing of the Phase Unwrapping Efficiency by Filtering the Residual Phase Image / A. Sosnovsky // Proceedings of ITNT 2021 - 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. 2021. P. 175882.
- [145] **Сосновский, А.В.** Исследование и модификация метода формирования встречного вихревого поля для развертывания фазы / А.В. Сосновский // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Vol. 5. № 3. P. 239–257.
- [146] **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. Vol. 2274. P. 75–81.
- [147] Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК–95). ГКИНП (ГНТА)-06-278-04. — М.: ЦНИИГАиК, 2004.
- [148] Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000. ГКИНП-05-029-84. Утверждены ГУГК и ВТУ 25.06.84. — М.: РИО ВТС. 1984.
- [149] Экспериментальное исследование методов построения цифровых моделей рельефа по материалам радиолокационной космической съемки. Этап №1. Анализ методов построения ЦМР на основе стереоскопической и интерферометрической обработки космических радиолокационных изображений в различных диапазонах длин волн и поляризациях. Сравнение информационных возможностей радиолокационных данных высокого и сверхвысокого разрешения: отчет о научно-исследовательской работе / Васильев О.П. — Екатеринбург: ФГУП «Уральский региональный информационно-аналитический центр «Уралгеоинформ», 2009. — 115 с.
- [150] **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. 2016. Т.3. С. 1074–1081.
- [151] **Tough, R.J.A.** A Statistical Description of Polarimetric and Interferometric Synthetic Aperture Radar Data / R.J.A. Tough, D. Blacknell, S. Quegan // Proceedings of the Royal

Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1995. № 449(1937). P. 567–589.

[152] **Sosnovsky, A.V.** The problem of quality assessing for the methods of coherence maps calculation in InSAR remote sensing of the Earth data processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko, N.S. Vinogradova // B: Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1368. №3. P. 032023.

[153] **Sosnovsky, A.V.** InSAR data coherence estimation using 2D fast fourier transform / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko, N.S. Vinogradova, // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 1814. P. 98–105.