

*На правах рукописи*



ШИМКИН ПАВЕЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ОДНОПРОХОДНЫЙ БОРТОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ  
РАДИОЛОКАТОР С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ  
ПЕРЕДНЕБОКОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЛЬЕФА  
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре радиотехнических приборов и антенных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

**Научный руководитель:** **Баскаков Александр Ильич,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

**Официальные оппоненты:** **Захаров Александр Иванович,**  
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиолокационных систем и методов Фрязинского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Егоров Виктор Валентинович,**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований РАН

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов» (АО «НИИ ТП»)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, прошу направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



И.Б. Власов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Предпосылкой активного развития за последние десятилетия радиолокационного дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является серьезный скачок в теории и технике построения радиолокационных систем (РЛС) ДЗЗ, в частности, радиолокаторов с синтезируемой апертурой антенны (РСА), устанавливаемых на борт беспилотных, авиационных или космических носителей. Это привело к тому, что современные РСА позволяют формировать радиолокационные изображения (РЛИ) исследуемого региона подстилающей поверхности (ПП) Земли с разрешающей способностью порядка единиц метров и выше, близкие по качеству к оптическим изображениям независимо от состояния атмосферы и времени суток. Однако, использование РСА в привычном виде дает возможность получать только двумерные распределения интенсивности отраженного сигнала, изучать структуру ПП и отражательные свойства исследуемого региона. В связи с этим, дальнейшее повышение геоинформативности авиационных и космических средств ДЗЗ можно связать с развитием теории и техники радиолокационной интерферометрии. Первостепенно, она позволяет решить задачу формирования трехмерного картографирования и получения высокоточных топографических карт и цифровых моделей рельефа (ЦМР) поверхности Земли. Кроме того, использование интерферометрии дает ряд дополнительных возможностей получения информации по сравнению с обычными методами анализа амплитудного РЛИ, таких как определение сдвигов, уклонов земной поверхности, т.е. обнаружение изменений поверхности за время между сеансами наблюдения, мониторинг приграничных территорий, селекцию движущихся целей и др. Следует отметить, что немаловажным фактором является оперативность получаемой интерферометрической информации и последующее ее применение для решения вышеперечисленных задач.

Таким образом, важнейшей актуальной *научной задачей* на современном этапе развития средств ДЗЗ, является круглогодичное и круглосуточное, при любых метеоусловиях, на больших расстояниях, с высокой точностью и разрешающей способностью оперативное получение трехмерных изображений поверхности Земли с формированием ЦМР и топографических карт.

### **Степень разработанности проблемы**

Фундаментальные исследования, развитие теории и методов обработки интерферометрических данных, разработку принципов построения авиационных и космических комплексов РСА, методов и алгоритмов обработки многомерных сигналов при решении задач оперативного получения детального рельефа местности, оценивания состояния земной и морской поверхностей развивали такие известные ученые как Л.Б. Неронский, А.И. Захаров, А.И. Баскаков, М.И.

Бабокин, Н.А. Zebker, S.N. Madsen, R.M. Goldshtein, M.A. Richards C. V. Jakowatz, W. G. Carrara, W. G. Goodman и др. Результатом их исследований явились такие разработки интерферометрических комплексов как космические RADARSAT-1/2 (Канада), ERS-1/2 (Европа), SRTM (США), ENVISAT ASAR (Европа), ALOS PALSAR (Япония), TerraSAR-X и Tandem-X (Германия), «Кондор-Э» (Россия) и авиационные CCRS C-SAR (США), IFSAR/STAR3i (США), RTV (США), GeoSAR (США).

На сегодняшний день, идеология построения интерферометрических РСА (ИРСА) комплексов с борта одного носителя РСА базируется на реализации одного из двух способов сбора данных об исследуемом регионе для интерферометрической обработки: использование комплекса с «мягкой» базой или с «жесткой базой». Построение комплекса с «жесткой» базой физически предполагает наличие двух разнесенных на антенную базу приемных апертур, на каждой из которых имеется независимый когерентный приемник, но при этом одна из антенн работает на излучение и прием. Соответственно, для получения пары комплексных РЛИ необходимо один раз пролететь над поверхностью и собрать данные с каждого из приемников РЛС. При использовании комплекса с «мягкой» базой необходимо использовать один носитель РСА с одной антенной системой, но формирование двух РЛИ потребует повторного пролета над исследуемой поверхностью. При этом пути пролета жестко контролируются для сохранения требуемой базы и во избежание сильной декорреляции радиоизображений. Преимущества ИРСА с «жесткой» базой – относительная простота компенсации движения и высокая стабильность базы, в связи с жестко закрепленными антеннами, а также отсутствие временной декорреляции между снимками. Недостатками являются цена и сложность такой системы, а также обычно недостаточный размер базы. Соответственно, главным преимуществом «мягкой» базы является наличие всего одного приемопередатчика (антенны) на борту носителя, что значительно снижает стоимость и сложность. Однако, при этом появляются такие существенные недостатки, как сложность контроля размера базы, связанная с высокоточным выходом носителя на второй проход, и временная декорреляция, вызванная тем, что проходы могут происходить через значительный промежуток времени, в условиях которого возможны даже не столько значительные изменения рельефа местности, сколько изменения в мелкоструктурных характеристиках поверхности, которые приведут к появлению интенсивных разностно-фазовых шумов, маскирующих рельеф подстилающей поверхности. Например, растаявший лед, выпавшие снег или дождь. «Мягкая» база в основном нашла применение в космических системах. Здесь, кроме вышеуказанных недостатков, проявляется также низкая оперативность получения информации. Возможность получения необходимых достаточно больших размеров базы позволяет надеяться на более высокие

точностные характеристики, чем при реализации «жесткой» базы, имеющей конструктивные ограничения.

В связи с этим, *перспективным* является направление исследований и предложение *новых* способов радиолокационного интерферометрического зондирования в задачах получения высокоточных трехмерных изображений ПП, лишенных вышеуказанных недостатков. Одним из таких способов является однопроходный ИРСА с одной антенной, работающий в режиме скошенного переднебокового обзора.

### **Цель диссертации**

*Целью* диссертационной работы является исследование способа радиолокационного интерферометрического зондирования с помощью однопроходного однопозиционного ИРСА авиационного базирования при решении задач оперативного оценивания рельефа ПП.

### **Задачи, требующие исследования**

Для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Анализ и обоснование требований к перспективным радиолокационным комплексам, предназначенным для получения детальных трехмерных изображений и высокоточного формирования рельефа земной поверхности, использующие сложные зондирующие сигналы с целью реализации высокого пространственного разрешения получаемых карт рельефа.

2. Исследование потенциальных точностных характеристик однопроходного однопозиционного ИРСА переднебокового обзора и проведение его сравнительного анализа с наиболее близким аналогом организации ИРСА на борту одного носителя.

3. Разработка математических моделей отраженных сигналов и структуры радиолокационных комплексов с синтезированной апертурой антенны, с учетом априорной неопределенности местного рельефа.

4. Реализация алгоритмов обработки сигналов в современных программных пакетах для имитационного моделирования алгоритмов работы комплексов ИРСА с демонстрацией возможностей моделируемых систем.

5. Экспериментальная проверка и отладка алгоритмов интерферометрической обработки радиоголограмм, записанных на борту авиационного носителя предлагаемой схемы организации ИРСА в ходе испытательных полетов.

### **Научная новизна** результатов исследований, полученных лично автором:

1. Предложен эффективный способ измерения рельефа ПП, реализованный на примере однопозиционного интерферометрического комплекса авиационного базирования, с обоснованием выбора размера базы интерферометра, оптимального по критерию минимума дисперсии ошибки оцениваемого рельефа ПП.

2. Рассчитаны и проанализированы потенциальные точностные характеристики ИРСА и впервые проведено сравнение по точности измерений рельефа ПП однопроходным однопозиционным ИРСА переднебокового обзора с близким по идеологии построения авиационным однопозиционным ИРСА с «мягкой» базой.

3. Разработана оригинальная имитационная модель бортового однопроходного ИРСА переднебокового обзора, ориентированная на проверку возможности его использования в качестве перспективного инструмента ДЗЗ в задачах оперативного измерения рельефа ПП.

4. Разработано и экспериментально проверено специализированное программное обеспечение (ПО), предназначенное для проверки и отладки алгоритмов интерферометрической обработки реальных радиоголограмм, полученных в ходе экспериментальных полетов с бортовым ИРСА переднебокового обзора.

**Практическая значимость** заключается в следующем:

1. Использование однопроходного ИРСА переднебокового обзора дает возможность оперативного получения информации на борту одного носителя с одним РСА без необходимости во второй приемной антенне и практически одновременного с РЛИ получение ЦМР ПП, с требованием частичной модификации бортового ПО цифровой обработки сигналов и контроля за зоной обзора без доработки аппаратной части.

2. Разработанная программно-алгоритмическая реализация расчета и анализа потенциальных точностных характеристик ИРСА комплексов позволяет выбрать наиболее выгодный режим зондирования с точки зрения минимизации погрешности оценки рельефа ПП. Потенциальные значения точности измерений рельефа ПП с помощью однопроходного ИРСА переднебокового обзора сопоставимы с потенциальными точностными характеристиками близкого к нему аналога при прочих равных условиях.

3. Сформированные принципы построения структуры имитационного компьютерного моделирования интерферометрических РСА и разработанная программа в современном программно-математическом пакете MATLAB, позволяют гибко анализировать работу моделируемых ИРСА комплексов в широком диапазоне вариаций условий наблюдения, характеристик ЦМР и параметров ИРСА.

4. Разработанное прикладное ПО позволяет оперативно обрабатывать экспериментальные радиоголограммы и в результате получать двухмерные и трехмерные РЛИ исследуемого региона, а дополнительный режим статистической обработки дает возможность оптимизации размера базы ИРСА и извлечения информации о реальной точности измерения рельефа путем исследования коэффициента корреляции пар РЛИ и визуального и инструментального сравнения с данными из Google Earth.

## **Методы исследования**

При решении поставленных в работе задач использованы методы современной статистической радиолокации, теории оптимальной фильтрации, цифровой обработки сигналов, имитационного компьютерного моделирования и программирования в пакете прикладных программ MATLAB. Проведение экспериментального исследования осуществлено по реальным радиоголограммам, записанным в ходе испытательных полетов авиационного РСА.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Эффективный способ организации ИРСА переднебокового обзора авиационного базирования с размером базы интерферометра, оптимальным по критерию минимума дисперсии ошибки оцениваемого рельефа ПП, позволяет оперативно получить информацию о рельефе ПП за один проход носителя РСА без необходимости в дополнительной приемной антенне.

2. Расчет, анализ потенциальных точностных характеристик бортового однопроходного ИРСА переднебокового обзора и их сравнение с потенциальными точностными характеристиками бортового двухпроходного ИРСА бокового обзора с «мягкой» базой показывают сопоставимый порядок точности измерений при прочих равных условиях.

3. Имитационные компьютерные модели интерферометрических РЛС, реализованные в современном программно-математическом пакете MATLAB, позволяют гибко анализировать работу моделируемых ИРСА комплексов в широком диапазоне вариаций условий наблюдения, характеристик ЦМР и параметров ИРСА, и подтверждают возможность использования однопроходного ИРСА переднебокового обзора в качестве перспективного инструмента при решении задач оперативного измерения рельефа ПП.

4. Экспериментальная отработка алгоритмов интерферометрической обработки сигналов по реальным радиоголограммам, записанным в ходе испытательных полетов однопроходного однопозиционного ИРСА авиационного базирования подтверждает его работоспособность и эффективность, а результаты измерений рельефа ПП дают близкое совпадение характерных точек рельефа ПП с достоверными топографическими данными.

## **Степень достоверности научных результатов**

Достоверность научных результатов достигается благодаря строгому следованию известным положениям теории радиолокации, цифровой обработки сигналов, а также результатами имитационного компьютерного моделирования, подтверждающими основные теоретические положения диссертационной работы, сходимостью экспериментальных результатов оценки рельефа ПП исследуемым ИРСА с достоверными топографическими данными из Google Earth, апробацией основных результатов диссертационной работы на научно-

технических-конференциях и публикациями автора, одобренными научной общественностью.

### **Практическая направленность**

Результаты исследований использованы при выполнении НИР на кафедре радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»:

1. НИР в рамках выполнения Государственного задания в сфере научной деятельности в проектной части №8.152.2014/К Минобрнауки «Исследование радиолокационного трехмерного картографирования поверхности Земли с аэрокосмических аппаратов и наземными сканирующими РЛС».

2. НИР в рамках выполнения гранта РФФИ № 13-08-97538 «Новые методы и алгоритмы высокоточного дистанционного зондирования и мониторинга протяженных объектов для повышения эффективности разработки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и предотвращения катастроф техногенного характера».

Использование результатов исследования подтверждено актом, полученным в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

### **Апробация результатов диссертационной работы**

Результаты исследований докладывались и обсуждались на 12-ой международной научно-технической конференции «Авиация и космонавтика». М: НИУ МАИ, 2013; 20-ой, 21-ой и 22-ой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика». М: НИУ МЭИ, 2014 – 2016; международном научно-техническом семинаре «Методы и алгоритмы обработки квазидетерминированных и стохастических сигналов и изображений в условиях различной априорной неопределенности». М: НИУ МЭИ, 2014; 8-ой всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». М: ИРЭ РАН, 2014; 7-ой всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, Владимирская область, 2016.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 14 научных работах общим объемом 2,26 п.л., среди которых 5 статей, все в научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК РФ, в том числе 1 статья, индексируемая Web of Science и Scopus; 1 патент РФ на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, а также в материалах 6 научно-технических конференций. Материалы диссертации отражены в 2 научно-технических отчетах по НИР.

### **Структура и объем диссертации**

По своей структуре диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 136 наименований. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, приведен краткий обзор интерферометрических методов оценки рельефа подстилающей поверхности. Определены цели и задачи диссертационной работы, приведены методы исследований. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначены научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Даны сведения об апробации и публикациях результатов диссертации.

**В первой главе** проведен литературный обзор и анализ современного состояния развития ИРСА, кратко рассмотрены существующие ИРСА системы космического и авиационного базирования.

Помимо техники ИРСА для получения ЦМР, отмечены и другие методы когерентной обработки пары и более РЛИ, такие как дифференциальная и продольная РСА интерферометрия.

На примере авиационного ИРСА с «мягкой» базой, относящегося к технике поперечной РСА интерферометрии, подробно проанализирован интерферометрический метод оценки рельефа местности. Показано, что формирование карты высот с помощью ИРСА требует, помимо формирования как минимум пары РЛИ, выполнения сложного алгоритма интерферометрической обработки сигналов.

**Вторая глава** посвящена исследованию, анализу и сравнению точностных характеристик однопроходного однопозиционного ИРСА переднебокового обзора. Предлагаемая схема построения однопроходного однопозиционного

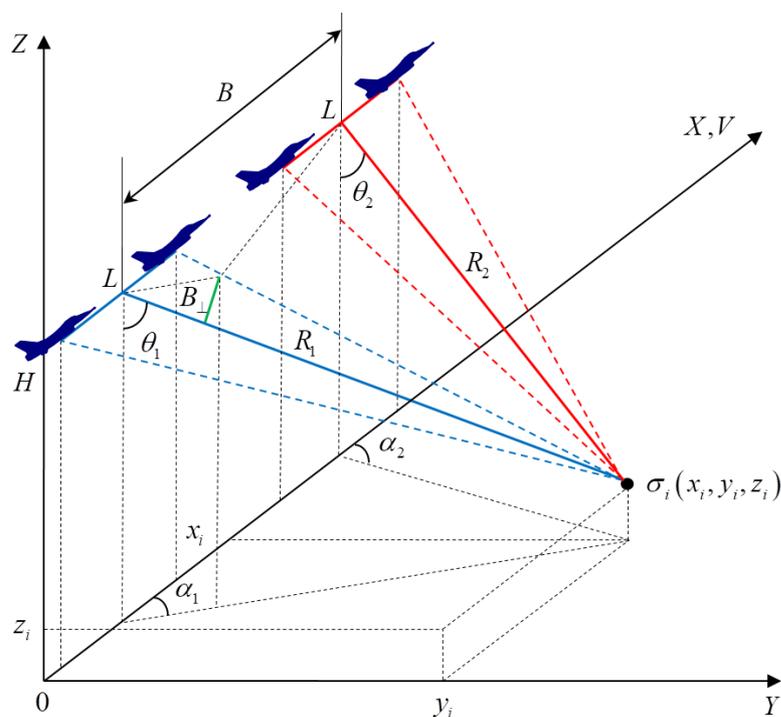


Рисунок 1. Геометрия визирования однопроходного ИРСА переднебокового обзора

ИРСА переднебокового обзора, изображенная на Рисунке 1, отличается от общеизвестных схем тем, что пространственное разнесение обеспечивается за счет естественного перемещения носителя РСА по направлению движения, а стабилизация луча на определенном участке земной поверхности путем использования скошенного телескопического способа зондирования.

Описан принцип работы однопроходного

ИРСА переднебокового обзора, заключающийся в последовательном наблюдении за одной и той же областью поверхности с помощью прожекторного режима на дальности  $R_1$ , азимуте  $\alpha_1$ , угле места  $\theta_1$  – в первом сеансе и  $R_2$ ,  $\alpha_2$ ,  $\theta_2$  – во втором, при постоянной высоте полета носителя РСА  $H$  и скорости  $V$ , см. Рисунок 1, где  $L$  – размер синтезируемой апертуры. Второй сеанс наблюдения производится при перемещении носителя на расстояние базы интерферометра  $B$ , в результате чего возникает перпендикулярная проекция базы интерферометра  $B_{\perp}$ , позволяющая произвести интерферометрические измерения рельефа ПП.

Выведена однозначная связь между параметрами наблюдения и интерферометрической разностью фаз (ИРФ)  $\phi$ :

$$z_i = H - R_1 \sqrt{1 - \left( \frac{R_1^2 + B^2 - \left( R_1 - \frac{\lambda}{4\pi} \phi \right)^2}{(2R_1 B \cos \alpha_1)} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны передатчика РСА.

Для определения потенциальных точностных характеристик измерения рельефа ПП получено соотношение для флуктуационной погрешности  $\sigma_{z\hat{\phi}}$  (2), связанной с оценкой ИРФ  $\hat{\phi}$ .

$$\sigma_{z\hat{\phi}} = \frac{\lambda H \tan \theta_1}{4\pi B \cos \alpha_1 \cos \theta_1} \sigma_{\hat{\phi}}; \quad \sigma_{\hat{\phi}} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\hat{\phi}}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) ИРФ;  $N$  – кратность некогерентного накопления;  $\gamma$  – коэффициент корреляции между двумя РЛИ, образующими интерферометрическую пару.

Кроме известных составляющих коэффициента корреляции  $\gamma$ , а именно: декорреляции за счет пространственного разнесения двух приемников –  $\gamma_{spatial}$ ; временной декорреляции, связанной с физическими изменениями на поверхности между двумя наблюдениями –  $\gamma_{temporal}$  ( $\gamma_{temporal} = 1$  для переднебокового ИРСА); декорреляции за счет теплового шума в системе РСА –  $\gamma_{noise}$ , показано и учтено в расчетах, что для переднебокового интерферометра характерен еще один фактор, ухудшающий коррелированность, связанный с формированием базы интерферометра вдоль трассы полета носителя РСА. Вследствие того, что поверхность зондируется с двух разных азимутальных углов, в результате появляется раскоррелированность РЛИ, вызванная взаимным разворотом изображений на некоторый угол, зависящий от размера базы –  $\gamma_{rotation}$ .

Выведены аналитические выражения каждого из факторов и определен результирующий коэффициент корреляции (3), в предположении о том, что реальная поверхность является распределенной радиолокационной целью,

состоящей из набора независимых парциальных отражателей внутри элемента разрешения, ординаты которых распределены по нормальному закону:

$$\gamma = \underbrace{\left(1 - \frac{2B \cos \alpha_1 \cos \theta_1}{\lambda R_1 \tan \theta_1} \Delta r\right)}_{\gamma_{spatial}} \cdot \exp \left[ -2\pi^2 \left( \frac{\sigma_h B \cos \alpha_1 \cos \theta_1}{\lambda R_1 \sin \theta_1} \right)^2 \right] \times \underbrace{\frac{1}{1 + SNR^{-1}}}_{\gamma_{noise}} \times \underbrace{\left(1 - \frac{2\Delta x \sin \theta_1}{\lambda} \left| \arctan \left( \frac{B \sin \alpha_1}{H \tan \theta_1 - B \cos \alpha_1} \right) \right| \right)}_{\gamma_{rotation}}, \quad (3)$$

где  $\Delta r$  – разрешение по наклонной дальности;  $\sigma_h$  – СКО ординат мелких неровностей на поверхности крупного рельефа;  $\Delta x$  – разрешение по азимуту;  $SNR$  – отношение сигнал/шум.

Окончательные выражения для СКО оценки ординат рельефа через СКО оценки ИРФ получены в результате подстановки (3) в (2).

Произведено сравнение потенциальных точностных характеристик, изображенных на Рисунках 2 – 5, двух вариантов реализации ИРСА, для чего выведены подобные (2) и (3) выражения и для ИРСА с «мягкой» базой (двухпроходный однопозиционный ИРСА бокового обзора).

Сравнение производится при фиксированных численных параметрах:  $H = 5$  км;  $V = 250$  м/с;  $\alpha_1 = 30^\circ$ ;  $\theta_1 = 45^\circ$ ;  $SNR = 10$  дБ;  $N = 4$ ;  $\Delta r = 0,5$  м;  $\Delta x = \Delta y = \Delta r / \sin \theta_1 \approx 0,7$  м;  $\sigma_h = 0,01$  м и строгом соблюдении фиксированного размера разноса двух последовательных траекторий ИРСА с «мягкой» базой.

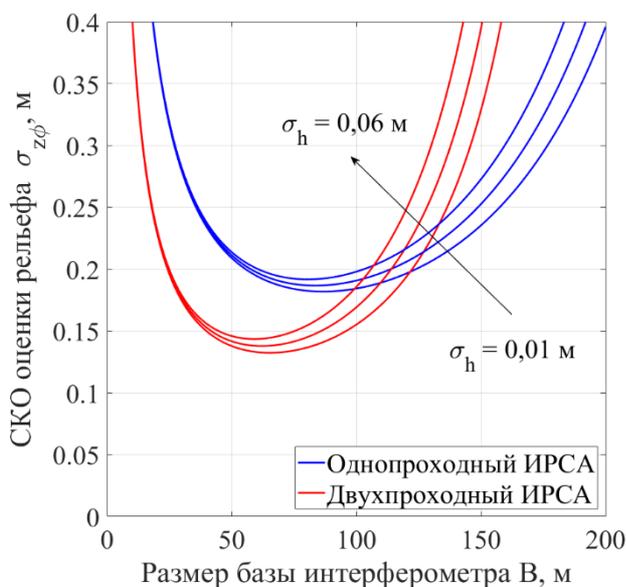


Рисунок 2. Сравнение  $\sigma_{z\hat{\phi}}(B)$  при различных  $\sigma_h$

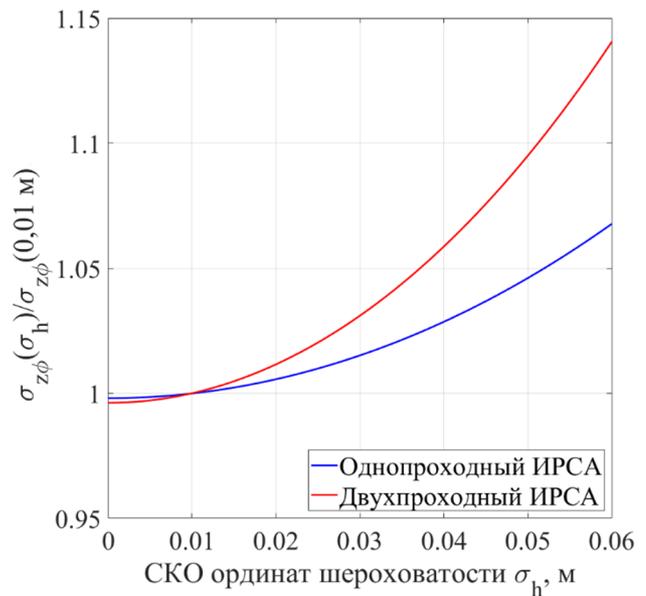


Рисунок 3. Сравнение  $\sigma_{z\hat{\phi}}(\sigma_h) / \sigma_{z\hat{\phi}}(0,01 \text{ м})$  при оптимальном размере  $B$

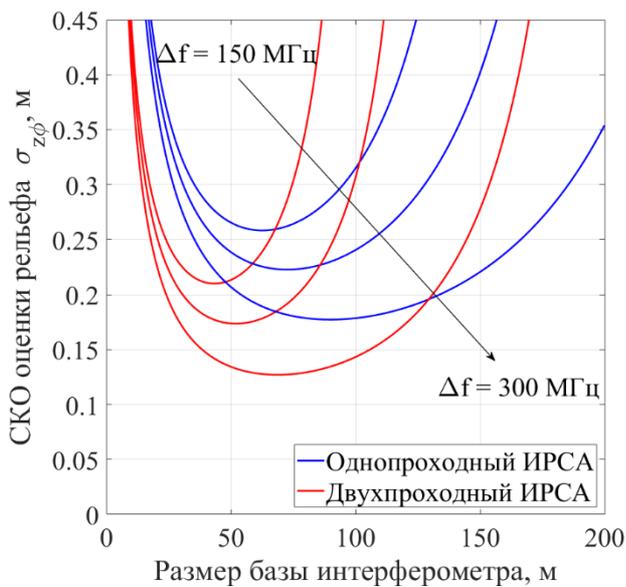


Рисунок 4. Сравнение  $\sigma_{z\phi}(B)$  при различной ширине спектра  $\Delta f$  зондирующего сигнала

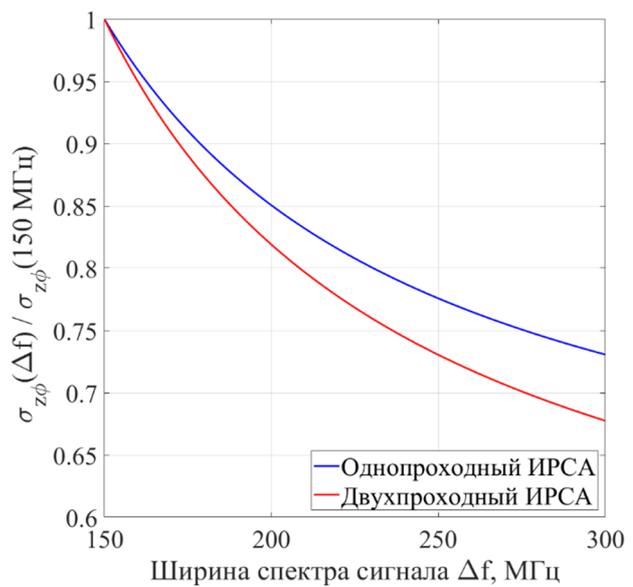


Рисунок 5. Сравнение  $\sigma_{z\phi}(\Delta f) / \sigma_{z\phi}(150 \text{ МГц})$  при оптимальном размере  $B$

В завершении главы приводится подробный анализ полученных результатов.

В третьей главе описана структура разработанных имитационных моделей авиационных ИРСА систем. Наглядные результаты моделирования показаны на примере задаваемой пользователем ЦМР, изображенной на Рисунке 6, а), местами представляющей собой по типу поверхность из воды, песка, почвы, травы и снега – Рисунок 6, б), по виду – овражно-холмистую структуру.

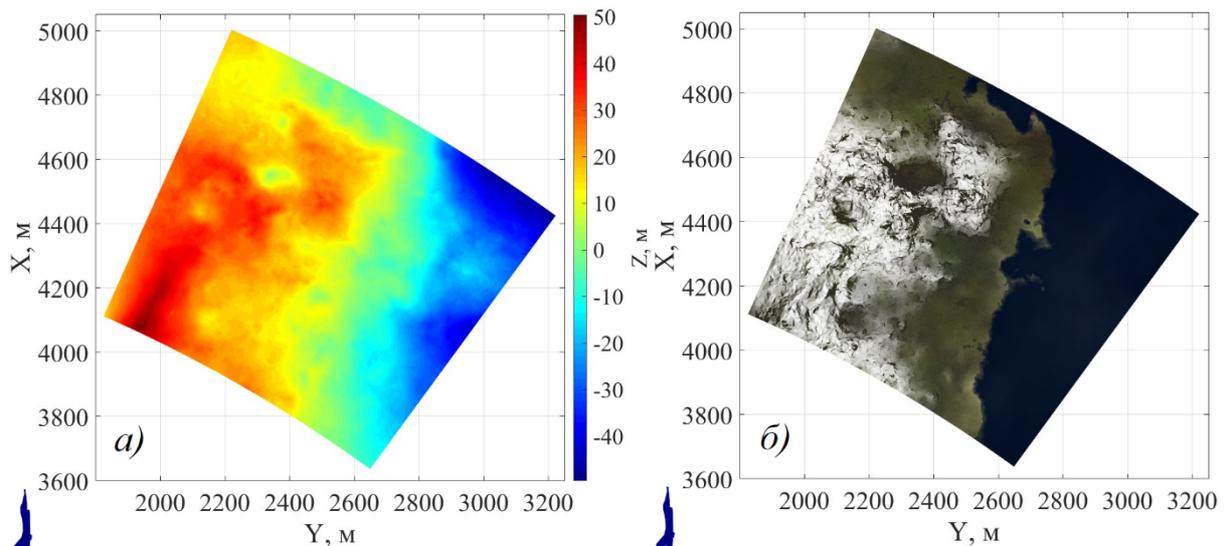


Рисунок 6. а) заданная ЦМР; б) заданный тип поверхности

В качестве параметров ИРСА использованы значения, близкие к параметрам реального бортового РСА:  $\alpha_1 = 30^\circ$ ;  $\theta_1 = 45^\circ$ ;  $\Delta r = 5 \text{ м}$ ;  $\Delta x = \Delta y \approx 7$

м;  $R_1 \approx 7,5$  км;  $L \approx 46$  м. При заданных параметрах, пересчитанный согласно (2 – 3) оптимальный размер базы интерферометра составил  $B = 7,8$  м.

Результаты интерферометрической обработки пары синтезированных РЛИ для однопроходного ИРСА переднебокового обзора при  $SNR \approx 10$  дБ показаны на Рисунках 7 – 9. Полученная в результате моделирования точность оценки рельефа ПП  $\hat{\sigma}_{z\phi} \approx 2,1$  м коррелирует с потенциально возможной, которая в пересчете с заданными параметрами для исследуемого ИРСА составила  $\sigma_z \approx 2$  м.

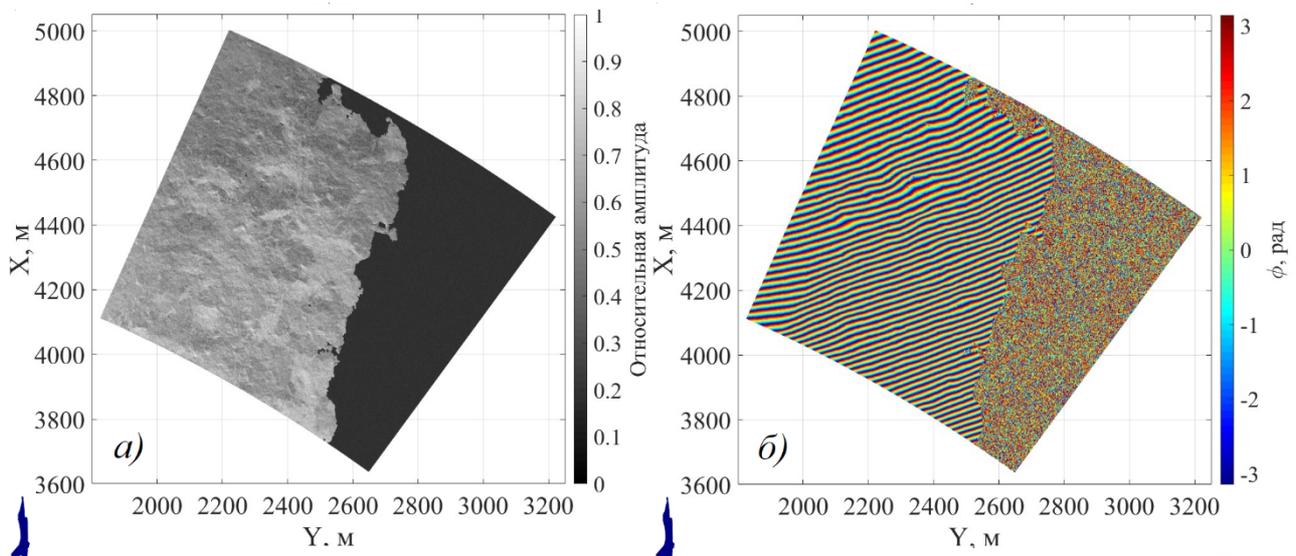


Рисунок 7. а) амплитудное РЛИ с одного из сеансов наблюдения; б) ИРФ по результатам моделирования с заданной ЦМР

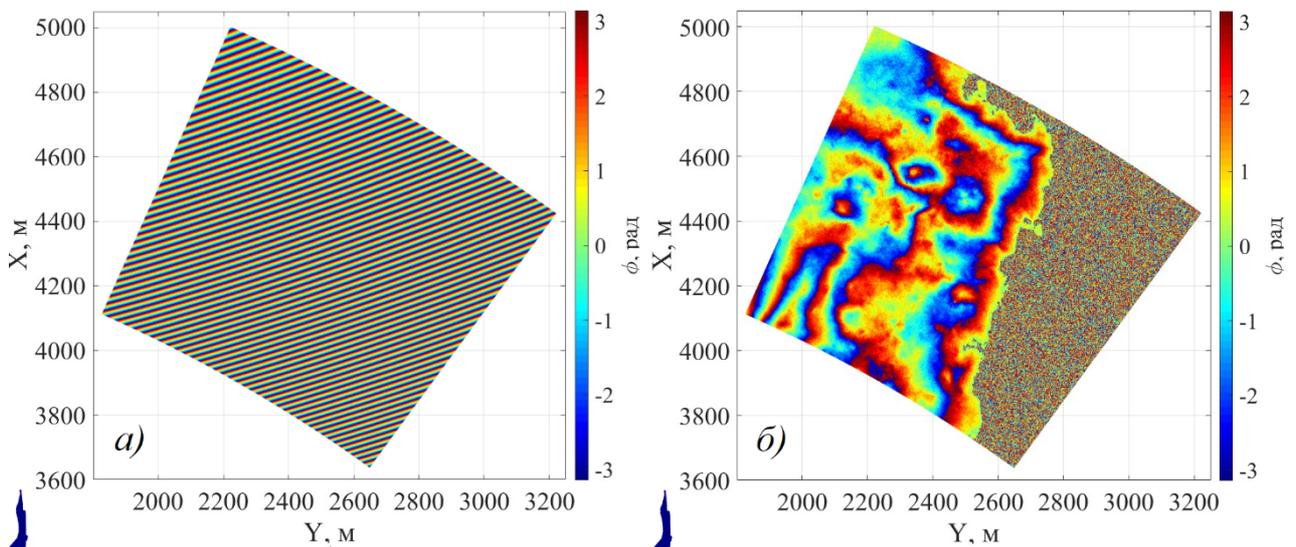


Рисунок 8. а) рассчитанный по заданной геометрии облучения линейный набег ИРФ; б) свернутая ИРФ с отфильтрованным линейным набегом ИРФ

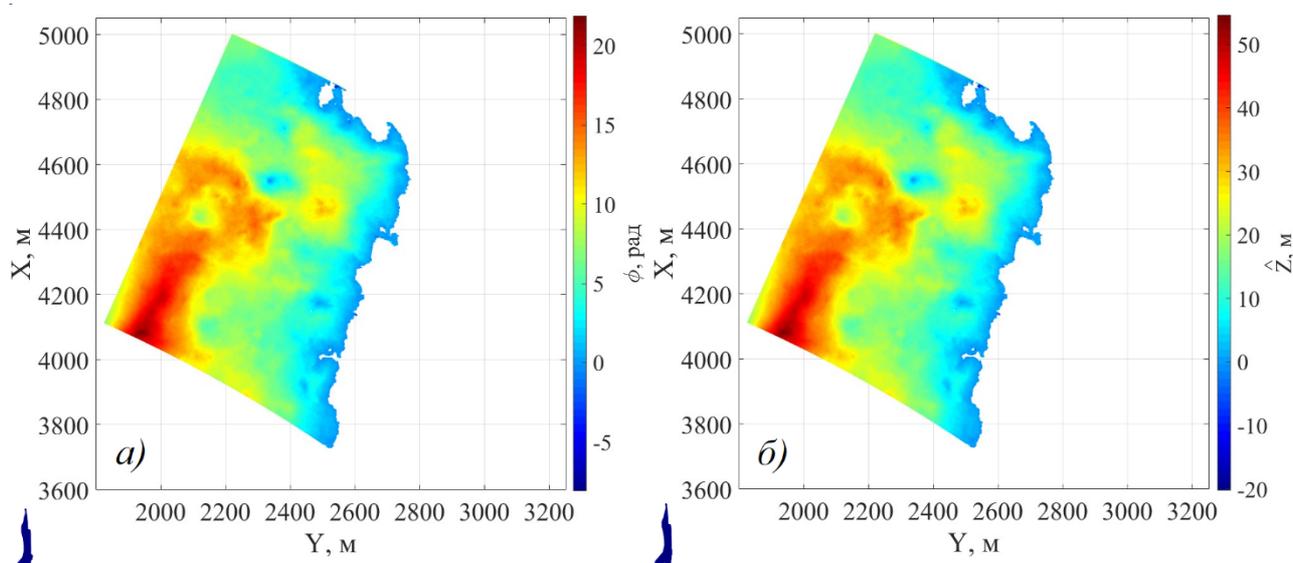


Рисунок 9. а) развернутая ИРФ по алгоритму раскрытия фазовой неоднозначности Гольдштейна-Вернера-Зибкера; б) восстановленный рельеф ПП

Помимо демонстрации работоспособности предлагаемой схемы однопроходного переднебокового ИРСА в главе приводится моделирование, визуальное и качественное сравнение результатов по точности измерений восстановленной ЦМР при различном отношении сигнал/шум с двухпроходной интерферометрической съемкой.

**Четвертая глава** посвящена описанию и реализации эксперимента интерферометрической обработки сигналов однопроходного ИРСА переднебокового обзора на основе радиоголограмм, записанных в ходе испытательных полетов авиационного носителя РСА Су-30 в районах Астраханской и Волжской областей, с визуальным и инструментальным сравнением с данными из Google Earth, результаты которого показаны на Рисунках 10 – 11. Пустые области на Рисунке 10, в) и Рисунке 11, в) соответствуют низкому значению коэффициента корреляции пары РЛИ, недостаточному для проведения интерферометрических измерений рельефа ПП.

Особенность интерферометрической обработки однопроходного переднебокового ИРСА, а именно, возможность использования одного увеличенного интервала синтеза с разбиением на подынтервалы на этапе цифровой обработки, позволила исследовать реальный коэффициент корреляции пары РЛИ, и извлечь информацию о квазипотенциальной точности измерений рельефа местности в зависимости от размера базы ИРСА и выбрать его оптимальный размер. Так, для района горы Большое Богдо  $B \approx 23,7$  м,  $\hat{\sigma}_z \approx 8,7$  м при параметрах съемки:  $R_1 \approx 40$  км,  $H \approx 8$  км,  $\alpha_1 \approx 30^\circ$ ,  $L \approx 231,3$  м,  $V \approx 200$  м/с; а для района Волжской ГЭС  $B \approx 32$  м,  $\hat{\sigma}_z \approx 1,6$  м, при параметрах съемки  $R_1 \approx 60$  км,  $H \approx 5$  км,  $\alpha_1 \approx 40^\circ$ ,  $L \approx 308$  м,  $V \approx 150$  м/с.

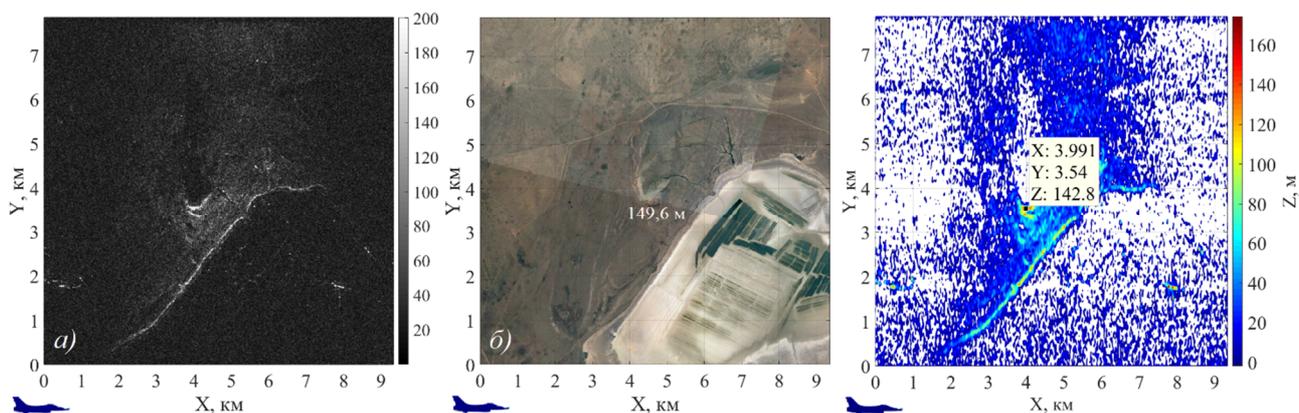


Рисунок 10. Сравнение с данными из Google Earth района горы Большое Богдо: а) амплитудное РЛИ; б) трехмерное изображение из Google Earth; в) полученная ЦМР

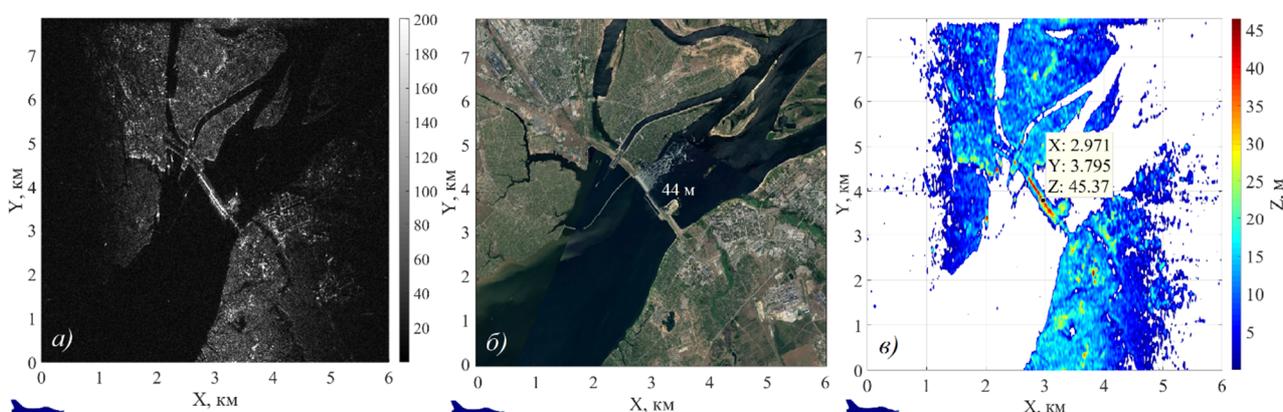


Рисунок 11. Сравнение с данными из Google Earth района Волжской ГЭС: а) амплитудное РЛИ; б) трехмерное изображение из Google Earth; в) полученная ЦМР

Экспериментально продемонстрирована возможность использования предлагаемой схемы ИРСА при решении задач получения ЦМР.

**В заключении** сформулированы общие выводы и основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен анализ уровня техники современных радиолокационных комплексов, предназначенных для получения детальных трехмерных изображений и высокоточного формирования рельефа земной поверхности, и предложен эффективный способ измерения рельефа ПП, реализованный на примере ИРСА авиационного базирования, с обоснованием выбора размера базы интерферометра, отличающийся оперативностью получения информации о рельефе ПП за один проход носителя РСА без необходимости во второй приемной антенне РСА.

2. Выведены математические соотношения, позволяющие рассчитать, исследовать и проанализировать предельные точностные характеристики однопроходного ИРСА переднебокового обзора, и проведено оригинальное

сравнение точности его измерений с близким аналогом-прототипом авиационного ИРСА с «мягкой» базой. Получено, что однопроходный ИРСА переднебокового обзора по порядку точности измерений рельефа ПП не уступает двухпроходному ИРСА бокового обзора, при прочих равных условиях.

3. Теоретические исследования потенциальных точностных характеристик однопроходного ИРСА переднебокового обзора при выборе перспективных его параметров с достаточно высокими требованиями по разрешающим способностям  $\Delta x = \Delta y \approx 0,7$  м показали порядок точности измерений рельефа ПП на уровне десятков сантиметров  $\sigma_z \approx 0,17 \dots 0,25$  м.

4. Предложенная структура моделирования ИРСА на уровне цифровой обработки сигналов успешно реализована в современном пакете прикладных программ MATLAB и в результате разработаны имитационные модели авиационных ИРСА комплексов, позволяющие демонстрировать и анализировать их работу в широком диапазоне вариаций условий наблюдения, параметров ЦМР и параметров ИРСА, подтверждающие возможность использования исследуемого ИРСА в качестве перспективного инструмента в задачах оперативного измерения рельефа ПП.

5. Имитационное компьютерное моделирование однопроходного ИРСА переднебокового обзора с пониженными требованиями к разрешающим способностям  $\Delta x = \Delta y \approx 7$  м реально существующих РСА систем дает ожидаемое ухудшение точности измерений рельефа ПП до  $\hat{\sigma}_z \approx 2,1$  м, близкое к потенциально возможному значению, теоретически рассчитанному для данных конкретных условий.

6. Разработано специализированное ПО, ориентированное на проверку и отладку алгоритмов интерферометрической обработки реальных радиоголограмм, записанных в ходе испытательных полетов в рамках эксперимента, результаты которого также подтвердили работоспособность однопроходного однопозиционного ИРСА переднебокового обзора.

7. Полученные в результате экспериментов значения точности измерений рельефа ПП порядка единиц метров  $\hat{\sigma}_z \approx 1,6$  м и  $\hat{\sigma}_z \approx 8,7$  м однопроходным бортовым ИРСА переднебокового обзора, удовлетворяют мировым стандартам классификации цифровых данных о высоте местности (ЦДВМ) ЦМР 2-го и 3-го уровня и HRE (high-resolution elevation, стандарт представления высот с высоким разрешением) 1-го (HREGR) и 2-го уровня (HRE80).

8. Экспериментальное отличие точности измерений рельефа ПП, объясняется существенным различием в геометрии наблюдения при радиолокационной съемке рассмотренных областей, а также ошибочным распознаванием объектов на РЛИ как высотных, в связи с знакопеременным скачком ИРФ в соседних элементах разрешения на границах областей с резко изменяющейся отражающей способностью.

9. Основным преимуществом использования однопроходного ИРСА переднебокового обзора является оперативность получения информации на борту одного носителя с одним РСА без необходимости во второй приемной антенне и практически одновременное с РЛИ получение ЦМР ПП, с требованием частичной модификации бортового ПО цифровой обработки сигналов и контроля за зоной обзора без доработки аппаратной части.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в том числе статьи в зарубежных журналах, индексируемых Web of Science/Scopus:*

1. **Шимкин П.Е.**, Баскаков А.И., Бабокин М.И. Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. № 5. С. 103–112. (0,625 п.л. / 0,3 п.л.);

2. **Шимкин П.Е.** Имитационная модель однопроходного РСА интерферометра переднебокового обзора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 4. С. 17–25. (0,56 п.л. / 0,56 п.л.);

3. Баскаков А.И., **Шимкин П.Е.** Сравнение точностных характеристик двух способов построения авиационных интерферометрических РСА // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 22. С. 77–83. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.);

4. **Шимкин П.Е.**, Баскаков А.И. Моделирование алгоритмов обработки сигналов двухпроходного авиационного интерферометрического РСА // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 1–19. (1,25 п.л. / 0,625 п.л.);

5. Баскаков А.И., **Шимкин П.Е.** Исследование потенциальной точности определения местного рельефа авиационным интерферометрическим РСА при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2013. № 10. С. 71–74. (0,25 п.л. / 0,125 п.л.);

*Патенты и свидетельства:*

6. Способ измерения рельефа поверхности Земли: пат. 2643790 РФ / **П.Е. Шимкин**, А.И. Баскаков, М.И. Бабокин; заявл. 08.12.2016; опубл. 06.02.2018. Бюлл. № 4;

7. Программа для интерферометрической обработки экспериментальных радиоголограмм авиационного радиолокатора с синтезированной апертурой антенны: свидетельство 2017614032 / **П.Е. Шимкин**; заявл. 17.02.2017; опубл. 05.04.2017;

8. Имитационная модель авиационного интерферометрического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны: свидетельство 2017614174 / **П.Е. Шимкин**; заявл. 17.02.2017; опубл. 06.04.2017.

*Публикации в других научных изданиях:*

9. **Шимкин П.Е.**, Баскаков А.И., Бабокин М.И. Экспериментальная отработка алгоритмов оценивания рельефа с помощью однопроходного переднебокового РСА интерферометра // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред.: Сбор. докл. VII Всерос. науч. конф. Муром, 2016. С. 244–250. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.);

10. **Шимкин П.Е.** Интерферометрическая обработка радиоголограмм авиационного РСА при переднебоковом обзоре // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика.: Тез. докл. XXII Междун. науч.-технич. конф. студ. и асп., 2016. Т.1. С. 94. (0,0625 п.л. / 0,0625 п.л.);

11. **Шимкин П.Е.** Моделирование алгоритмов обработки и обоснование выбора параметров авиационных интерферометрических комплексов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика.: Тез. докл. XXI Междун. науч.-технич. конф. студ. и асп., 2015. Т.1. С. 95. (0,0625 п.л. / 0,0625 п.л.);

12. **Шимкин П.Е.**, Баскаков А.И. Моделирование алгоритмов обработки сигналов двухпроходного авиационного интерферометрического РСА // Радиолокация и радиосвязь.: Сбор. докл. VIII Всерос. конф. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014. С. 369. (0,0625 п.л. / 0,03 п.л.);

13. **Шимкин П.Е.** Точностные характеристики авиационного интерферометрического РСА при переднебоковом обзоре // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика.: Тез. докл. XX Междун. науч.-технич. конф. студ. и асп., 2014. Т.1. С. 129. (0,0625 п.л. / 0,0625 п.л.);

14. **Шимкин П.Е.**, Баскаков А.И. Интерферометрические РСА на авиационных носителях для оценки рельефа подстилающей поверхности // Авиация и космонавтика.: Тез. докл. 12-ой Междун. конф. Санкт-Петербург, 2013. С. 512–522. (0,125 п.л. / 0,0625 п.л.).