

На правах рукописи



УШЕНКИН Виктор Андреевич

**АЛГОРИТМЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОТ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
НА ОСНОВЕ 3D-АНАЛИЗА НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2017

Работа выполнена в Рязанском государственном
радиотехническом университете (РГРТУ)

Научный руководитель: **Еремеев Виктор Владимирович**
доктор технических наук,
директор НИИ обработки аэрокосмических
изображений РГРТУ

Официальные оппоненты: **Кузнецов Павел Константинович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электропривод и промышленная автоматика»
Самарского государственного технического
университета

Спирин Андрей Викторович
кандидат технических наук, начальник отдела – заме-
ститель начальника научно-исследовательского управ-
ления Научно-исследовательского испытательного
центра (г. Курск) ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ

Ведущая организация: **Институт космических исследований РАН,
г. Москва**

Защита состоится **11 октября 2017 года в 12 ч** на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом
университете по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте
РГРТУ: <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время приоритетным направлением развития дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в России и за рубежом является создание систем радиолокационной съемки, способных вести наблюдение в темное и светлое время суток и при наличии облачности. При радиолокационной съемке, как правило, применяются когерентные источники излучения. В отличие от систем оптической съемки, в данном случае формируются изображения, каждый пиксель которых представляется не вещественным, а комплексным числом, включающим амплитуду (яркость) и фазу. Наличие информации о фазе дает возможность с высокой точностью измерить высоты объектов земной поверхности по двум изображениям одной местности, снятым с различных точек. Процесс нахождения высот точек местности по фазовой информации двух изображений общепринято называть интерферометрической обработкой. В отличие от традиционной стереообработки данных от оптических систем ДЗЗ, в основе интерферометрии лежит не сопоставление координат одноименных точек на двух изображениях, а сопоставление фаз.

Главной проблемой интерферометрической обработки является то, что известные технологии приводят к недопустимым ошибкам при резких изменениях высоты объектов. Эти ошибки распространяются на значительную часть наблюдаемой сцены. Поэтому разработка новых подходов к повышению точности интерферометрической обработки является актуальной задачей.

В настоящей диссертации предложен подход к повышению точности определения высот объектов наблюдаемой сцены путем интерферометрической обработки за счет анализа амплитуд и фаз обрабатываемых изображений с привлечением цифровых моделей рельефа (3D-моделей), полученных ранее другими системами ДЗЗ на всю земную сушу, но с меньшей точностью и многократно худшим пространственным разрешением.

Соответствие паспорту специальности 05.13.01. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)» в части:

- пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;
- пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;
- пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Новые исследования в диссертации посвящены разработке алгоритмов *анализа и обработки информации*, сформированной космическими системами ДЗЗ, осуществляющими когерентную радиолокационную съемку.

Степень разработанности темы. Проблема интерферометрической обработки информации за рубежом начала активно исследоваться с конца 1970-х годов в рамках национальных и международных космических программ:

- в США – миссии шаттлов «Колумбия», «Челленджер», «Индевор» (1981, 1984, 1994, 2000 гг.) и проект космической системы SeaSat (1978 г.);
- в Евросоюзе – космические системы ERS-1 (1991 г.), ERS-2 (1995 гг.), ENVISAT (2002 г.), Sentinel-1A (2014 г.), Sentinel-1B (2016 г.);
- в Японии – проекты JERS-1 (1992 г.), ALOS (2006 г.), ALOS-2 (2014 г.);
- в Канаде – системы RadarSat-1 (1995 г.) и RadarSat-2 (2007 г.);
- в Германии – системы TerraSAR-X (2007 г.) и TanDEM-X (2010 г.);
- в Италии – системы Cosmo-SkyMed № 1–4 (2007–2010 гг.);
- в Индии – проект RISAT-1 (2012 г.);
- в Кореи – проект KOMPSAT-5 (2013 г.).

В рамках этих проектов наибольший вклад в развитие технологий интерферометрической обработки внесли зарубежные ученые R.M. Goldstein, C.L. Werner, H.A. Zebker, M. Costantini, D.C. Ghiglia, L.A. Romero, C.W. Chen, I.G. Cumming, W. Xu, C. Prati, F. Rocca, R.F. Hanssen и др.

В СССР работы в данном направлении начаты в 1980-е годы при создании космических систем «Космос-1870» и «Алмаз-1» (1987 и 1991 гг.). После распада СССР работы приостановились и возобновлены в России лишь в последнее десятилетие в рамках проектов «Аркон-2», «Кондор-ФКА», «Обзор-Р» и др. Ведущую роль в этих работах осуществляют коллективы Ракетно-космического центра «Прогресс», НПО им. С.А. Лавочкина, НПО машиностроения, Института космических исследований РАН, Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники РАН, НИИ точных приборов, Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Концерна радиостроения «Вега», фирмы «Ракурс» и др.

Целью диссертации является создание алгоритмов обработки интерферометрической информации, обеспечивающих повышение точности определения высот наблюдаемых объектов за счет анализа амплитуд и фаз обрабатываемых изображений с привлечением менее точных 3D-данных, полученных ранее другими системами ДЗЗ на всю земную сушу.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**.

Задача 1. Анализ известных технологий интерферометрической обработки информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли и выявление причин возникновения ошибок определения высоты объектов.

Задача 2. Создание алгоритмов высокоточного *развертывания фазы* на интерферометрическом изображении на основе анализа обрабатываемой информации с привлечением существующих опорных 3D-моделей наблюдаемой сцены более низкого разрешения по плану и высоте. Развертыванием фазы общепринято называть переход от относительных значений, известных в пределах периода волны излучения, к абсолютным значениям фазы путем прибавления целого числа периодов.

Задача 3. Разработка алгоритмов предварительной обработки интерферометрического изображения и опорной информации о рельефе: комплексирования цифровых моделей рельефа от различных систем ДЗЗ; субпиксельного сов-

мещения интерферометрической пары изображений; уточнения фазы плоского рельефа и пространственной базы.

Задача 4. Практическая реализация разработанных алгоритмов и оценка их точности на натурной информации от космических систем оптической и радиолокационной съемки Земли.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в ней предложены алгоритмы обработки космической интерферометрической информации, которые позволяют примерно в 9 раз повысить точность измерения высот объектов наблюдаемой сцены за счет анализа амплитуд и фаз обрабатываемых изображений с привлечением опорных 3D-моделей местности, полученных ранее различными системами ДЗЗ с меньшей точностью и многократно худшим пространственным разрешением. Такой подход защищен патентом RU 2612322 С1.

Основные новые научные положения, выносимые на защиту:

- алгоритмы развертывания фазы на интерферометрическом изображении на основе 3D-анализа наблюдаемой сцены, позволяющие примерно в 9 раз повысить точность определения высоты;
- алгоритм повышения точности опорной 3D-модели наблюдаемой сцены на основе комплексирования цифровых моделей рельефа от различных систем ДЗЗ;
- алгоритм высокоскоростного субпиксельного совмещения интерферометрической пары изображений на основе полиномиальной аппроксимации геометрических искажений, обусловленных рельефом наблюдаемой сцены;
- алгоритмы уточнения фазы плоского рельефа и пространственной базы на основе сопоставления интерферометрического изображения и фазовой картины опорного рельефа.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней предложены и исследованы новые алгоритмы высокоточной обработки интерферометрической информации от систем ДЗЗ и на основе этих алгоритмов создано специальное программное обеспечение, получившее эффективное внедрение на практике.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием методов оптимизации, линейной алгебры, математической статистики, теории графов, цифровой обработки изображений.

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР 16-13, ОКР 32-13 и НИР 9-14Г. Для экспериментальной отработки предложенных алгоритмов реализована комплексная технология наземной обработки информации от космических систем ДЗЗ радиодиапазона, начиная с формирования изображений по данным радиолокационной съемки и заканчивая оценкой качества продуктов обработки изображений. Результаты диссертации в виде алгоритмов и программного обеспечения внедрены в Ракетно-космическом центре «Прогресс» и Научно-производственном объединении им. С.А. Лавочкина, что подтверждается актами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 7 международных и 7 всероссийских научно-технических кон-

ференциях: на международных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2014), «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2015), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2016 и 2017), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2016 и 2017); на всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2014, 2015 и 2016), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014, 2015 и 2016), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2015).

Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, экспериментальными исследованиями и практическим внедрением.

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа: 9 статей (7 по списку ВАК), патент на изобретение, 21 тезис докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения, содержащего документы о внедрении результатов. Основной текст работы включает 147 с, 32 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 129 наименований на 15 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проводится анализ известных технологий интерферометрической обработки информации от современных систем ДЗЗ и выявляются причины возникновения ошибок определения высот объектов наблюдаемой сцены.

По результатам выполненного анализа сделан главный вывод: центральным и наименее решенным вопросом интерферометрической обработки является процесс развертывания фазы. Известные алгоритмы часто приводят к глобальным ошибкам, кратным периоду волны излучения. Это обусловлено тем, что они не учитывают два момента:

1) различную природу возникновения так называемых фазовых разрывов – сильных изменений фазы за один отсчет интерферограммы (фазоразностного изображения);

2) априорные сведения о наблюдаемой сцене – глобальные низкодетальные трехмерные цифровые модели рельефа (ЦМР), полученные ранее другими системами ДЗЗ на всю земную сушу, но с меньшей точностью и многократно худшим пространственным разрешением.

С учетом этих замечаний определены направления новых научных исследований, результаты которых составляют основу диссертации.

Первое направление включает разработку новых, более точных алгоритмов развертывания фазы на основе привлечения опорной 3D-модели наблюдаемой сцены и учета параметров, определяемых путем анализа интерферограммы и по-разному применяемых к фазовым разрывам различной природы. В рамках этого направления обоснована необходимость решения следующих задач:

- разработки алгоритмов отдельной идентификации фазовых разрывов различной природы;
- исследования вопроса привлечения опорного рельефа для надежного выявления разрывов фазы, обусловленных резкими перепадами высот объектов наблюдаемой сцены;
- построения алгоритма окончательного развертывания фазы по результатам выявления фазовых разрывов.

Второе направление связано с разработкой алгоритмов предварительной обработки интерферометрической и опорной информации, предоставляющих исходные данные для процесса развертывания фазы. Здесь возникают проблемные вопросы, без решения которых невозможно обеспечить высокую точность исходных данных для развертывания фазы.

Во-первых, существующие глобальные низкодетальные ЦМР на отдельных участках содержат артефакты (грубые ошибки оценки высоты). Поэтому актуальна разработка алгоритма повышения точности опорного рельефа путем комплексирования нескольких ЦМР, на которых артефакты расположены по-разному.

Во-вторых, существующие алгоритмы высокоточного совмещения интерферометрической пары изображений характеризуются большим объемом вычислений. Поэтому целесообразна разработка алгоритма высокоскоростного совмещения, сохраняющего высокую точность.

В-третьих, для учета опорного рельефа при развертывании фазы необходимо получить его фазовую картину, точно зная пространственную базу, и вычлечь из сигнала интерферограммы фазу плоского рельефа, правильно ее оценив. Существующие алгоритмы позволяют получить высокоточные оценки указанных величин только после развертывания фазы. Следовательно, требуется разработать алгоритмы уточнения указанных величин до развертывания фазы.

Важными вопросами являются практическая реализация и экспериментальные исследования разработанных алгоритмов.

В главе 2 разработан ряд алгоритмов, которые в совокупности обеспечивают более точное развертывание фазы. Они основаны на новых подходах: отдельном выявлении коротких и длинных линий разрыва фазы на основе анализа интерферограммы и привлечении опорной низкодетальной 3D-модели наблюдаемой сцены.

Задача развертывания фазы формулируется как восстановление по известным свернутым значениям $\varphi_{cs}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) \in (-\pi, \pi]$ абсолютных значений фазы $\varphi(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = \varphi_{cs}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + 2\pi k_{разв}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$, где $(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ – координаты пикселя в строке и столбце (дальность и азимут), $k_{разв}$ – целое число периодов. В основе развертывания фазы лежит восстановление ее градиента $\mathbf{G}_{cs} = (G_{x_{cs}}, G_{y_{cs}})$ в предположении, что за один пиксель фаза изменяется менее чем на половину периода, составляющего 2π радиан:

$$\begin{aligned} G_{x_{cs}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= \arg(\exp(j(\varphi_{cs}(R_{01} + \Delta R_{01}, \eta_{\perp 1}) - \varphi_{cs}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))), \\ G_{y_{cs}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= \arg(\exp(j(\varphi_{cs}(R_{01}, \eta_{\perp 1} + \Delta \eta_{\perp 1}) - \varphi_{cs}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))), \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔR_{01} , $\Delta \eta_{\perp 1}$ – шаги дискретизации по строке и столбцу, j – мнимая единица.

Однако в ряде пикселей истинные градиенты фазы $G_x(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ и $G_y(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ могут отличаться от полученных оценок $G_{x_{c\phi}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ и $G_{y_{c\phi}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ на целое количество периодов. Такую ситуацию принято называть фазовым разрывом. Разрывы располагаются на интерферограмме вдоль некоторых линий, заканчивающихся в так называемых сингулярных точках, в которых $\xi = G_{x_{c\phi}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + G_{y_{c\phi}}(R_{01} + \Delta R_{01}, \eta_{\perp 1}) - G_{x_{c\phi}}(R_{01}, \eta_{\perp 1} + \Delta \eta_{\perp 1}) + G_{y_{c\phi}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ от-
лично от нуля. Знак ξ определяет положительный или отрицательный заряд сингулярной точки. При этом сумма зарядов сингулярных точек на противоположных концах одной линии разрыва равняется нулю.

Короткие линии разрыва фазы (длиной до нескольких пикселей) обычно вызваны фазовыми шумами. Предложен алгоритм выявления таких линий, основанный на предположении, что они вероятнее всего ориентированы перпендикулярно к направлению локального наклона фазовой поверхности. Локальный наклон $\mathbf{G}_n(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = (G_{x_n}(R_{01}, \eta_{\perp 1}), G_{y_n}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))$ предложено оценивать как

$$\begin{aligned} G_{x_n}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= \arg(\exp(j(\varphi_{\partial\phi}(R_{01} + \Delta R_{01}, \eta_{\perp 1}) - \varphi_{\partial\phi}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))), \\ G_{y_n}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= \arg(\exp(j(\varphi_{\partial\phi}(R_{01}, \eta_{\perp 1} + \Delta \eta_{01}) - \varphi_{\partial\phi}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))). \end{aligned} \quad (2)$$

Фаза $\varphi_{\partial\phi}$ – результат модифицированной медианной фильтрации $\varphi_{c\phi}$:

$$\varphi_{\partial\phi}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = \arg(\exp(j(\text{Me}\{\Delta\varphi_{mn}; m = -W, W, n = -W, W\} + \varphi_{cp}))), \quad (3)$$

где Me – медиана, $(2W + 1) \times (2W + 1)$ – размеры окна фильтрации,

$$\Delta\varphi_{mn} = \arg(\exp(j(\varphi_{c\phi}(R_{01} + m\Delta R_{01}, \eta_{\perp 1} + n\Delta\eta_{\perp 1}) - \varphi_{cp} - G_{x_{cp}}m - G_{y_{cp}}n))),$$

$$\varphi_{cp} = \arg\left(\sum_{m=-W}^W \sum_{n=-W}^W \exp(j\varphi_{c\phi}(R_{01} + m\Delta R_{01}, \eta_{\perp 1} + n\Delta\eta_{\perp 1}))\right),$$

$$G_{x_{cp}} = \frac{1}{2W(2W + 1)} \sum_{m=-W}^{W-1} \sum_{n=-W}^W G_{x_{c\phi}}(R_{01} + m\Delta R_{01}, \eta_{\perp 1} + n\Delta\eta_{\perp 1}),$$

$$G_{y_{cp}} = \frac{1}{2W(2W + 1)} \sum_{m=-W}^W \sum_{n=-W}^{W-1} G_{y_{c\phi}}(R_{01} + m\Delta R_{01}, \eta_{\perp 1} + n\Delta\eta_{\perp 1}).$$

Выявление коротких линий разрыва фазы осуществляется путем квазими-
нимизации суммарной стоимости потоков, проводимых по дугам транспортной
сети. Узлы сети располагаются между пикселями интерферограммы и соединя-
ются горизонтальными и вертикальными дугами. Потоки проводятся между уз-
лами, соответствующими противоположно заряженным сингулярным точкам.
Под стоимостью потока понимается суммарная длина дуг, по которым он прове-
ден. Основные отличия от известных решений, также базирующихся на миними-
зации стоимости потоков в сетях, следующие. Минимизация является нестрогой
и выполняется с помощью «жадного» алгоритма, проводящего в первую очередь
наиболее «дешевые» потоки. При этом вводится максимально возможная стои-
мость потока, позволяющая ограничиться выявлением только коротких линий
разрыва фазы. Также модифицируется структура транспортной сети путем до-
бавления в нее диагональных дуг, и вводятся новые правила задания длин дугам
в соответствии с полученной оценкой \mathbf{G}_n . Градиент фазы на выявленных корот-
ких линиях фазовых разрывов предлагается восстанавливать как

$$\begin{aligned}
G_{x_{KLP}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= G_{x_{св}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + 2\pi(k_{\downarrow}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} - \Delta\eta_{\perp 1}/2) - \\
&- k_{\uparrow}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2) + k_{\partial 4}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} - \Delta\eta_{\perp 1}/2) + \\
&+ k_{\partial 3}(R_{01} - \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} - \Delta\eta_{\perp 1}/2) - k_{\partial 2}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2) - \\
&- k_{\partial 1}(R_{01} + 3\Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2)), \\
G_{y_{KLP}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) &= G_{y_{св}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + 2\pi(k_{\leftarrow}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2) - \\
&- k_{\rightarrow}(R_{01} - \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2) + k_{\partial 4}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} - \Delta\eta_{\perp 1}/2) - \\
&- k_{\partial 3}(R_{01} - \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2) - k_{\partial 2}(R_{01} - \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + 3\Delta\eta_{\perp 1}/2) + \\
&+ k_{\partial 1}(R_{01} + \Delta R_{01}/2, \eta_{\perp 1} + \Delta\eta_{\perp 1}/2)), \quad (4)
\end{aligned}$$

где k_{\downarrow} , k_{\uparrow} , k_{\leftarrow} , k_{\rightarrow} , $k_{\partial 1}$, $k_{\partial 2}$, $k_{\partial 3}$, $k_{\partial 4}$ – количество единиц потока, проведенного по дуге, направленной из заданного узла соответственно вниз, вверх, влево, вправо, влево и вверх, вправо и вверх, вправо и вниз, влево и вниз.

Длинные линии разрыва фазы обычно вызваны резкими изменениями высоты объектов наблюдаемой сцены. Предложен алгоритм *предварительной идентификации* таких разрывов. Он основан на наблюдении, что они чаще всего располагаются в областях с резким изменением крутизны или направления локального наклона \mathbf{G}_n , выявляемых по критерию:

$$\min\{\tilde{s}(\mathbf{G}_n(R_{01}, \eta_{\perp 1}), \mathbf{G}_n(R_{01} + m\Delta R_{01}, \eta_{\perp 1} + n\Delta\eta_{\perp 1})); m, n = \overline{-W, W}\} < \varepsilon_{\tilde{s}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \tilde{s}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2), & G_{\max} > G_{\text{верх}}, \\ (s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) - 1)(G_{\max} - G_{\text{ниж}})/(G_{\text{верх}} - G_{\text{ниж}}) + 1, & G_{\text{ниж}} < G_{\max} \leq G_{\text{верх}}, \\ 1, & G_{\max} \leq G_{\text{ниж}}; \end{cases}$$

$G_{\max} = \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|)$; $\varepsilon_{\tilde{s}}$, $G_{\text{верх}}$ и $G_{\text{ниж}}$ – пороги, подбираемые эмпирически;

$$s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} 0,5 \cdot \mathbf{G}_1 \mathbf{G}_2 / (\max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|))^2 + 0,5, & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) > 0, \\ 1, & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) = 0. \end{cases}$$

Для *окончательной идентификации* длинных линий фазовых разрывов привлекается опорная 3D-модель наблюдаемой сцены $h_{\text{опор}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$. Ее фазовая картина $\varphi_{\text{моно}}(h_{\text{опор}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))$ вычитается из интерферограммы с дополнительным подавлением низкочастотных искажений:

$$\varphi_{\text{разн}_{св}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = \arg(BЧ\{\exp(j(\varphi_{св}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) - \varphi_{\text{моно}}(h_{\text{опор}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))))\}), \quad (6)$$

где $BЧ\{s(R_{01}, \eta_{\perp 1})\} = s(R_{01}, \eta_{\perp 1}) - \text{Gauss}_{\sigma_R, \sigma_\eta}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) * s(R_{01}, \eta_{\perp 1})$, $*$ – операция свертки, $\text{Gauss}_{\sigma_R, \sigma_\eta}$ – 2D-фильтр Гаусса с параметрами размытия по измерениям.

Предложен алгоритм *окончательной идентификации*, основанный на поиске локальных максимумов модуля вектора невязок градиента, возникающих после подавления низкочастотной составляющей на результате развертывания фазы $\varphi_{\text{МНК}}$ по весовому критерию наименьших квадратов:

$$\begin{aligned}
&\sum_m \sum_n w_x(R_{01m}, \eta_{\perp 1n})(G_{x_{\text{МНК}}}(R_{01m}, \eta_{\perp 1n}) - G_{x_{\text{KLP}}}(R_{01m}, \eta_{\perp 1n}))^2 + \\
&+ \sum_m \sum_n w_y(R_{01m}, \eta_{\perp 1n})(G_{y_{\text{МНК}}}(R_{01m}, \eta_{\perp 1n}) - G_{y_{\text{KLP}}}(R_{01m}, \eta_{\perp 1n}))^2 \rightarrow \min, \quad (7)
\end{aligned}$$

где $R_{01m} = R_{01\min} + m\Delta R_{01}$, $\eta_{\perp 1n} = \eta_{\perp 1\min} + n\Delta\eta_{\perp 1}$, $(R_{01\min}, \eta_{\perp 1\min})$ – координаты левого верхнего угла интерферограммы, w_x и w_y – веса, $\mathbf{G}_{\text{МНК}} = (G_{x_{\text{МНК}}}, G_{y_{\text{МНК}}}) =$

= grad $\varphi_{МНК}$. Градиенты G_{xKLP} и G_{yKLP} вычисляются с помощью (1) и (4), но не по $\varphi_{св}$, а по $\varphi_{разнсв}$.

Весы w_x и w_y задаются нулевыми в пикселях, выявленных по критерию (5), и на участках без полезного сигнала (низкой когерентности, затенения или неоднозначности опорной 3D-модели в системе координат интерферограммы). Окончательная идентификация выполняется за несколько итераций, на каждой из которых в точках локальных максимумов модуля вектора невязок градиента фазы обнуляются веса w_x и w_y . Процесс заканчивается, когда на некой k -й итерации участки с нулевыми весами w_{xk} и w_{yk} разделяют интерферограмму на изолированные области, в каждой из которых существенно меньше периода (2π радиан) разброс значений $\arg(\exp(j(\varphi_{МНКk}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) - \varphi_{разнсв}(R_{01}, \eta_{\perp 1})))$). При этом вычитание фазовой картины опорной 3D-модели в сочетании с подавлением низкочастотной составляющей на результате минимизации (7) гарантирует отсутствие глобальных ошибок развертывания фазы при достаточной точности опорной 3D-модели.

Предложен алгоритм окончательного развертывания фазы по результатам выявления фазовых разрывов, включающий:

1) восстановление среднего уровня развернутой фазы в изолированных областях с ненулевыми весами w_{xk} и w_{yk} с учетом опорной 3D-модели и плавности изменений фазы на интерферограмме;

2) проведение длинных линий фазовых разрывов в участках с нулевыми весами w_{xk} , w_{yk} и уточнение положения проведенных фазовых разрывов;

3) интерполяцию фазы в областях, не содержащих полезный сигнал.

Уточнение положения длинных линий фазовых разрывов выполняется на основе проведения потоков в транспортной сети. При этом транспортная сеть строится не по всей интерферограмме, а лишь в узких коридорах, в центре которых располагаются предварительно проведенные фазовые разрывы. Длины дуг сети назначаются по новым правилам с учетом величины, направления и вариаций наклона фазовой поверхности, а также амплитуды сигнала на исходных изображениях. В результате уточнения существенно уменьшается количество локальных ошибок развертывания фазы.

В главе 3 предложены алгоритмы предварительной обработки интерферометрической и опорной информации, обеспечивающие высокое качество исходных данных для развертывания фазы.

Предложен алгоритм повышения точности опорной 3D-модели наблюдаемой сцены, основанный на комплексировании ЦМР от различных систем ДЗЗ. Среди ЦМР выбирается наиболее точная и детальная в качестве базовой. Результат комплексирования совпадает с базовой ЦМР во всех участках, кроме тех, где выявлены артефакты (локальные грубые ошибки высоты) путем сравнения с другими ЦМР. Определены два основных типа артефактов.

Первый тип – ошибочное выделение водной поверхности на склоне рельефа с назначением фиксированной высоты. Такие артефакты предложено выявлять на основе правила, что водная поверхность не может быть выше, чем берег:

$$N_{сб} > \varepsilon_{сб} N_{б}, \quad (8)$$

где N_b – периметр области, занимаемой водной поверхностью (длина берега), N_{σ_b} – количество пикселей береговой линии, в которых высота более чем на σ_h ниже, чем у воды, σ_h – среднеквадратичная ошибка высоты на ЦМР, ε_{σ_b} – выбираемый эмпирическим путем порог, значительно меньший единицы.

Второй тип – грубые локальные ошибки с резкими границами. Выявлять их предложено в два этапа. На первом этапе находятся пиксели базовой ЦМР по критерию:

$$h_{\text{баз}mn} - h_{mn} \notin [-\Delta h_{\text{ниж}}, \Delta h_{\text{верх}}] \cup [-\varepsilon_{Gh} G_{h_{\text{max}mn}}, \varepsilon_{Gh} G_{h_{\text{max}mn}}], \quad (9)$$

где $h_{\text{баз}}$ и h – значения высоты на базовой и другой (альтернативной) ЦМР, $\Delta h_{\text{ниж}}$ и $\Delta h_{\text{верх}}$ – пороги допустимых отличий высоты для равнинной местности, $G_{h_{\text{max}mn}}$ – максимум модуля градиента высоты в малой окрестности mn -го пикселя альтернативной ЦМР, ε_{Gh} – выбираемый эмпирическим путем коэффициент учета градиента высоты на пересеченной местности.

В результате применения критерия (9) образуется некоторое количество «кандидатов» в артефакты, часть из которых отбраковывается на втором этапе их выявления. Артефактами признаются только «кандидаты», удовлетворяющие условию:

$$\sum_{i=1}^{N_{zp}} |G_{h_{zp \text{ баз}i}}| - |G_{h_{zp i}}| > \varepsilon_{zp} N_{zp}, \quad (10)$$

где $G_{h_{zp \text{ баз}i}}$ и $G_{h_{zp i}}$ – градиент высоты на базовой и альтернативной ЦМР в i -м пикселе границы «кандидата» в артефакты, направленный по внешней нормали к линии границы; N_{zp} – периметр области, занимаемой «кандидатом» в артефакты; ε_{zp} – неотрицательный порог, подбираемый эмпирическим путем.

Участки с артефактами на базовой ЦМР заполняются более точными данными из других источников с устранением нестыковок на границе участков.

Разработан алгоритм высокоскоростного субпиксельного совмещения интерферометрической пары изображений. Он основан на полиномиальной аппроксимации зависимости геометрических рассогласований изображений от высот точек наблюдаемой сцены. Обосновано, что для реальных условий интерферометрической съемки такая аппроксимация допустима и позволяет обеспечить точность совмещения порядка 0,1 пикселя при степени полинома $L = 2$.

Совмещение предлагается выполнять следующим образом. Диапазон высот объектов наблюдаемой сцены разбивается на L равных отрезков с узлами h_l , $l = \overline{0, L}$. По методу наименьших квадратов (МНК) строится $(L + 1)$ полиномиальная модель совмещения на фиксированной высоте h_l :

$$P_{R_l}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = \sum_i \sum_j k_{R_l ij} R_{01}^i \eta_{\perp 1}^j, \quad P_{\eta_l}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) = \sum_i \sum_j k_{\eta_l ij} R_{01}^i \eta_{\perp 1}^j, \quad (11)$$

где $k_{R_l ij}$ и $k_{\eta_l ij}$, $i + j \leq N_p$ – коэффициенты двумерных полиномов степени N_p .

Одна из построенных полиномиальных моделей выбирается базовой и обозначается как $P_{R_{\text{баз}}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ и $P_{\eta_{\text{баз}}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$. Закон преобразования координат $(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ на первом изображении в координаты $(R_{02}, \eta_{\perp 2})$ на втором изображении с учетом высоты h опорного рельефа задается базовой моделью и высотными поправками $P_{R_{R_{01}, \eta_{\perp 1}}}(h)$ и $P_{\eta_{R_{01}, \eta_{\perp 1}}}(h)$:

$$R_{02} = P_{R_{\bar{\alpha}z}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + P_{RR_{01}, \eta_{\perp 1}}(h), \quad \eta_{\perp 2} = P_{\eta_{\bar{\alpha}z}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) + P_{\eta_{R_{01}, \eta_{\perp 1}}}(h). \quad (12)$$

Высотные поправки $P_{R, \eta_{R_{01}, \eta_{\perp 1}}}(h)$ представляют собой полиномы степени L , проводимые через точки с координатами $(h_l, P_{R, \eta_l}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) - P_{R, \eta_{\bar{\alpha}z}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}))$.

Предложены *алгоритмы уточнения фазы плоского рельефа и пространственной базы* на основе сопоставления интерферограммы и фазовой картины опорного рельефа.

Фаза плоского рельефа – составляющая сигнала интерферограммы, не связанная с перепадами высоты. Ее погрешность можно аппроксимировать как

$$\Delta\varphi_{\text{плоск}}(R_{01}, \eta_{\perp 1}) \approx \Delta k_{R_{\text{плоск}}} R_{01} + \Delta k_{\eta_{\text{плоск}}} \eta_{\perp 1} + \Delta b_{\text{плоск}}, \quad (13)$$

где $\Delta k_{R_{\text{плоск}}}$, $\Delta k_{\eta_{\text{плоск}}}$, $\Delta b_{\text{плоск}}$ – коэффициенты зависимости.

Для вычленения $\Delta\varphi_{\text{плоск}}$ из сигнала интерферограммы предложено вычестить приближенно рассчитанную фазовую картину опорного рельефа $\varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}})$, а затем подавить высокочастотную составляющую сигнала путем размытия и прореживания. В результате получается сигнал $\Delta\varphi_{\text{нр1св}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$.

Выделено предварительное и окончательное уточнение фазы плоского рельефа. При предварительном уточнении находятся приближенные оценки $\Delta k_{R_{\text{плоск}}}$ и $\Delta k_{\eta_{\text{плоск}}}$ на основе усреднения градиентов фазы $\Delta\varphi_{\text{нр1св}}(R_{01}, \eta_{\perp 1})$ с весами, учитывающими когерентность сигнала.

Окончательное уточнение выполняется по МНК путем нахождения псевдорешения системы трансцендентных уравнений вида:

$$\arg(\exp(j(\Delta k_{R_{\text{плоск}}} R_{01i} + \Delta k_{\eta_{\text{плоск}}} \eta_{\perp 1i} + \Delta b_{\text{плоск}} - \Delta\varphi_{\text{нр1св}}(R_{01i}, \eta_{\perp 1i}))) = 0. \quad (14)$$

Из-за периодичности функции $\exp(j\varphi)$ псевдорешение предложено находить в 2 этапа. На первом этапе оно локализуется в пределах периода функции $\exp(j\varphi)$ путем полного перебора. За счет выполненного предварительного уточнения число вариантов для перебора невелико. На втором этапе псевдорешение итерационно уточняется с помощью алгоритма оптимизации нулевого порядка.

Под задачей *уточнения пространственной базы* понимается нахождение мультипликативной погрешности взаимной зависимости фазы и высоты. Уточнение предлагается выполнять по сигналу $\Delta\varphi_{\text{нр2св}}$, получаемому из $\Delta\varphi_{\text{нр1св}}$ путем вычитания найденной оценки $\Delta\varphi_{\text{плоск}}$ и прибавления $\varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}})$.

Алгоритм уточнения основан на сравнении среднеквадратичных отклонений (СКО) фаз $\Delta\varphi_{\text{нр2}}$ и $\varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}})$ во множестве малых фрагментов. Развернутая фаза $\Delta\varphi_{\text{нр2}}$ в пределах малого фрагмента получается из $\Delta\varphi_{\text{нр2св}}$ в предположении, что амплитуда ее вариаций не превышает половину периода:

$$\Delta\varphi_{\text{нр2}} = \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{\text{нр2св}} - \varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}}) - \hat{\varphi}))) + \varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}}), \quad (15)$$

где $\hat{\varphi}$ – фаза сигнала $\exp(j(\Delta\varphi_{\text{нр2св}} - \varphi_{\text{моно}}^*(h_{\text{опор}})))$, усредненного по фрагменту.

Поправка к мультипликативному коэффициенту зависимости фазы от высоты вычисляется как усреднение отношений СКО, найденных по фрагментам, с весами, назначаемыми с учетом когерентности и СКО высот опорного рельефа. Уточнение базы выполняется итерационно, поскольку на начальных итерациях из-за ошибок развертывания фазы по (15) поправка находится неточно.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований эффективности разработанных алгоритмов на натурной информации от зарубежных систем ДЗЗ. Объем статистической выборки составил 250 миллиардов пикселей. При этом привлекались глобальные ЦМР ALOS World 3D 30, SRTM1, ASTER GDEM и GMTED2010.

Выполнена оценка эффективности разработанных алгоритмов развертывания фазы в сравнении с известными алгоритмами по критериям скорости обработки и среднеквадратичной ошибки, вычисляемой как

$$\sigma = 2\pi \sqrt{|\Omega|^{-1} \sum_{(m,n) \in \Omega} \left[\Delta\varphi_{\varepsilon m} (R_{01\min} + m\Delta R_{\varepsilon m}, \eta_{\perp 1\min} + n\Delta\eta_{\varepsilon m}) / (2\pi) + 0,5 \right]^2}, \quad (16)$$

где Ω – множество пикселей, в которых производится оценка точности, $\lfloor x \rfloor$ – функция «пол» (целая часть), $\Delta\varphi_{\varepsilon m} = |\varphi_{\text{разм}} - \varphi_{\varepsilon m}|$, $\varphi_{\text{разм}}$ – развернутая фаза, размытая до разрешения эталона, $\varphi_{\varepsilon m}$ – эталонная фаза с шагами дискретизации $\Delta R_{\varepsilon m}$ и $\Delta\eta_{\varepsilon m}$. В качестве эталона принята фазовая картина результата комплексирования глобальных ЦМР ALOS World 3D, SRTM1, ASTER GDEM и GMTED2010. Пространственное разрешение эталона составляет около 30 м.

В исследованиях анализировалось три варианта развертывания фазы предложенными алгоритмами: с опорной информацией пространственного разрешения 300 м, 900 м и без ее использования.

Результаты исследований приведены в таблице 1. Ошибка развертывания фазы σ пересчитывалась в среднеквадратичную ошибку определения абсолютной высоты σ_h в предположении, что относительные значения фазы известны абсолютно точно, а одному фазовому периоду соответствуют 40 м высоты. Данное соотношение является типичным при интерферометрии. Из таблицы видно, что точность предложенных алгоритмов примерно в 3 раза выше по сравнению с лучшим из известных даже в отсутствие опорных данных и в 9 раз выше при их наличии. С увеличением детальности опорного рельефа точность развертывания фазы возрастает лишь незначительно. При этом скорость работы предложенных алгоритмов в одном потоке в 1,5–3 раза ниже, чем у большинства известных.

Таблица 1 – Точность и скорость работы алгоритмов развертывания фазы

Алгоритм развертывания фазы	σ , рад	σ_h , м	Средняя скорость обработки, КБ/с
Алгоритм Голдштейна–Зибкера–Вернера	$2,839\pi$	56,78	18200
Алгоритм на основе весового МНК	$0,7241\pi$	14,48	146
Алгоритм наращивания областей	$0,9176\pi$	18,35	296
Модификация алгоритма на основе минимизации стоимости потоков в реализации GAMMA ISP	$0,8043\pi$	16,08	989
Модификация алгоритма на основе минимизации стоимости потоков в реализации SARscape	$0,4462\pi$	8,924	210
Модификация алгоритма на основе минимизации стоимости потоков в реализации SNAPHU	$1,205\pi$	24,10	153
Предложенные алгоритмы без опоры	$0,1476\pi$	2,952	77,1
Предложенные алгоритмы с опорой 900 м	$0,05132\pi$	1,026	94,1
Предложенные алгоритмы с опорой 300 м	$0,04675\pi$	0,934	93,8

На рисунке 1 приведен в цветовой шкале пример пространственного распределения ошибок развертывания фазы предложенными алгоритмами и лучшим из известных. Белым цветом показаны области без полезного сигнала. На рисунке 2 представлена ЦМР, полученная после развертывания фазы предложенными алгоритмами, в сравнении с привлекаемой опорной 3D-моделью.

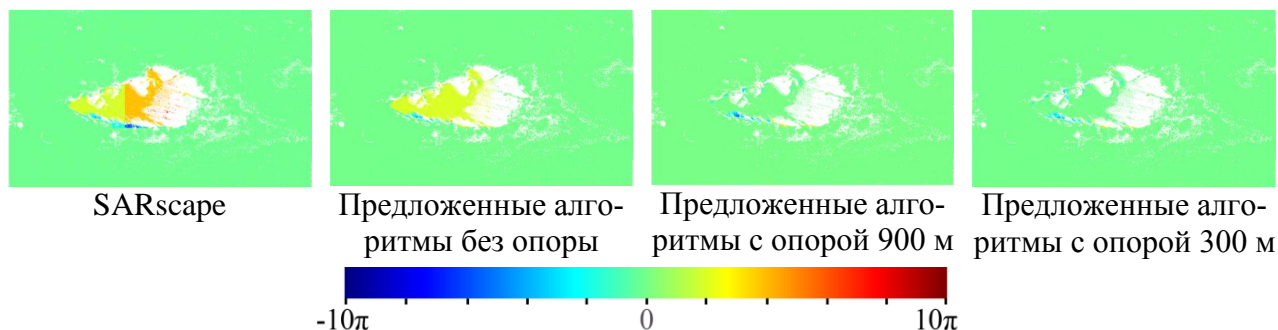


Рисунок 1 – Пример повышения точности развертывания фазы

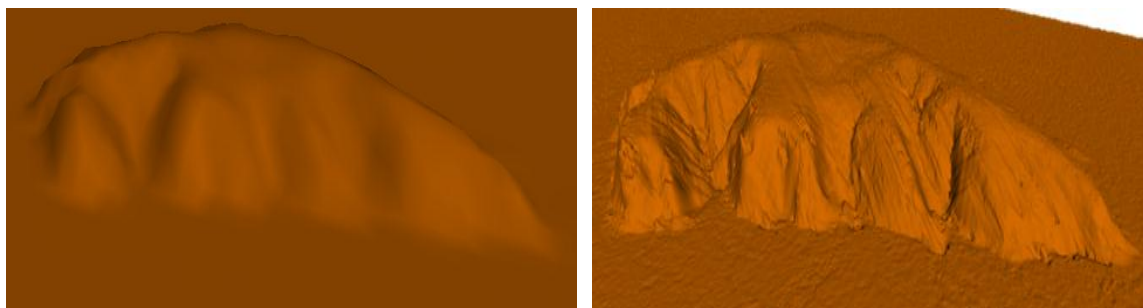


Рисунок 2 – Пример опорной 3D-модели и высокодетальной ЦМР, получаемой в результате интерферометрической обработки

Выполнена оценка эффективности разработанного алгоритма повышения точности опорной 3D-модели наблюдаемой сцены. Установлено, что на базовой ЦМР выявляется 99,3 % пикселей с артефактами первого типа, доля ошибочных выявлений – 0,238 %. В пределах покрытия ЦМР SRTM на базовой ЦМР ALOS World 3D выявляется и устраняется 76,3 % артефактов второго типа, а доля ошибочных выявлений – 11,9 %. За пределами покрытия ЦМР SRTM степень повышения точности опорной 3D-модели уменьшается из-за более низкого качества комплексируемых ЦМР: выявляется и устраняется 41,7 % артефактов второго типа, доля ошибочных выявлений – 34,6 %.

Выполнена оценка эффективности разработанного алгоритма совмещения интерферометрической пары изображений. Установлено, что полиномиальная аппроксимация очень близка по обеспечиваемой точности совмещения к строгой модели учета высоты рельефа: средняя когерентность сигнала интерферограмм, формируемых после совмещения, снижается всего на 0,00631, т.е. уровень шумов из-за ошибок совмещения практически не увеличивается. В то же время скорость совмещения увеличивается с 0,249 до 2,91 МБ/с и становится сопоставимой со скоростью совмещения без учета рельефа, составляющей 3,12 МБ/с.

Выполнена оценка эффективности разработанных алгоритмов уточнения фазы плоского рельефа и пространственной базы. Установлено, что выбор соответствующих порогов в критериях остановки итерационных вычислений позволя-

ет добиться, чтобы вариации остаточной фазы плоского рельефа составляли менее 1 м в пересчете на высоту и чтобы отличие СКО развернутой фазы в пересчете на высоту отличалось от СКО высот опорного рельефа менее чем на 1 м.

В рамках технологической линии наземной обработки данных от космической системы «Обзор-Р» разработано специальное программное обеспечение интерферометрической обработки, включающее программные модули, реализующие предложенные в диссертации алгоритмы и эффективно работающие на современных средствах вычислительной техники с большим объемом оперативной памяти и многоядерными процессорами. Результаты работы внедрены в Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара) и НПО им. С.А. Лавочкина (г. Химки Московской области).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проанализированы на предмет вычислительной сложности и точности существующие алгоритмы выполнения каждого из этапов интерферометрической обработки информации от систем ДЗЗ с целью определения высот объектов земной поверхности. Выявлены проблемные вопросы интерферометрической обработки и определены направления работ по их решению.

2. Разработаны алгоритмы высокоточного развертывания фазы на основе 3D-анализа наблюдаемой сцены: привлечения опорной 3D-модели и учета набора параметров, определяемых путем анализа интерферограммы и по-разному применяемых для каждого типа фазовых разрывов. На выборке из 250 миллиардов пикселей экспериментально установлено, что среднеквадратичная ошибка развертывания фазы предложенными алгоритмами уменьшается примерно в 9 раз по сравнению с лучшим из известных алгоритмов. В пересчете на высоту полученная оценка точности развертывания фазы составляет около 1 м.

3. Предложен алгоритм повышения точности опорной 3D-модели наблюдаемой сцены на основе комплексирования нескольких низкодетальных ЦМР, полученных от разных систем ДЗЗ и содержащих в различных местах артефакты – грубые ошибки высоты. Экспериментально установлено, что результат комплексирования обладает большей точностью по сравнению с исходными ЦМР за счет уменьшения количества артефактов, при этом степень повышения точности существенно зависит от исходного качества комплекслируемых ЦМР.

4. Разработан алгоритм высокоскоростного совмещения интерферометрической пары изображений на основе полиномиальной аппроксимации зависимости геометрических искажений от перепадов высоты рельефа. Экспериментально установлено, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность, сопоставимую с совмещением по строгой модели учета рельефа, в сочетании с высокой скоростью обработки, сопоставимой с совмещением без учета рельефа.

5. Предложены алгоритмы предварительного и окончательного уточнения фазы плоского рельефа, а также алгоритм уточнения перпендикулярной пространственной базы на основе сопоставления интерферометрического изобра-

жения и фазовой картины опорного рельефа. Экспериментально установлено, что алгоритмы обеспечивают определение высоты с метровой точностью.

6. Работа выполнена в рамках ОКР 16-13, ОКР 32-13 и НИР 9-14Г. В составе технологической линии наземной обработки данных от космической системы «Обзор-Р» разработано СПО, реализующее предложенные в диссертации алгоритмы высокоточной обработки интерферометрической информации и эффективно работающее на современных средствах вычислительной техники с большим объемом оперативной памяти и многоядерными процессорами. Результаты работы внедрены в Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара) и НПО им. С.А. Лавочкина (г. Химки Московской области).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по списку ВАК

1. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72–79.

2. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21–31.

3. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208–219.

4. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли // Радиотехника. 2016. №11. С. 120–127.

5. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при космической бистатической радиолокационной съемке Земли по сигналу интерферограммы // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 42–48.

6. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13–17.

7. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С.54–64.

Патент

8. Способ развертывания фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли: пат.

2612322 РФ: МПК G01S 13/90 / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2016113159; заявл. 07.04.2016; опубл. 07.03.2017, Бюл. № 7.

Статьи в межвузовских сборниках

9. Ушенкин В.А. Анализ алгоритмов фокусировки радиоголограмм от космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Информатика и прикладная математика: межвуз. сборник науч. трудов. 2014. № 20. С. 95–100.

10. Ушенкин В.А., Лесков Д.В. Уточнение параметров формирования и интерферометрической обработки радиолокационных изображений // Информатика и прикладная математика: межвузовский сборник научных трудов. 2015. № 21. С. 130–135.

Тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях

11. Ушенкин В.А. Первичная обработка данных космического радиолокатора высокого разрешения // XL Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. М.: МАТИ, 2014. Т. 8. С. 113–114.

12. Ушенкин В.А. Фокусировка и автофокусировка радиоголограмм космического радиолокатора с синтезом апертуры антенны // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании «НИТ 2014»: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2014. С. 251–252.

13. Ушенкин В.А. Когерентный анализ пар радиолокационных изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании «НИТ 2014»: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2014. С. 256–257.

14. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А., Найденов А.С. Вопросы первичной обработки данных радиолокационного космического зондирования Земли // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2014. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4390.

15. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетаальной радиолокационной информации // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения). 2015. Т. 1. С. 237–239.

16. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации с использованием опорного рельефа // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. 2015. С. 133–134.

17. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Восстановление высоты рельефа по радиолокационной интерферограмме на основе комбинирования методов развертывания фазы // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. 2015. С. 140–141.

18. Ушенкин В.А. Модификация и комбинирование методов развертывания фазы при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XX Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2015. С. 237–238.

19. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Проблемы интерферометрической обработки данных радиолокационного космического зондирования Земли // Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2015. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5115.

20. Ушенкин В.А. Развертывание фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. 2015. Т. 9. С. 128–131.

21. Лесков Д.В., Ушенкин В.А. Формирование изображений от космических радиолокационных систем наблюдения Земли // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. 2015. Т. 9. С. 118–123.

22. Ушенкин В.А. Комбинирование методов развертывания фазы при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под ред. О.В. Миловзорова. 2016. Т.2. С. 112–117.

23. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка информации от радиолокационных систем ДЗЗ с использованием априорных данных // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под ред. О.В. Миловзорова. 2016. Т.2. С. 117–121.

24. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка высокодетальной информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 206–207.

25. Еремеев В.В., Князьков П.А., Ушенкин В.А. Программно-математическое обеспечение оценки информационных параметров радиолокационного изображения // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5624.

26. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Высокоточное развертывание фазы при интерферометрической обработке радиолокационных снимков Земли // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5594.

27. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Проектирование алгоритмов обработки данных высокодетальной радиолокационной съемки Земли на основе имитацион-

ного моделирования // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5595.

28. Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при интерферометрической радиолокационной съемке Земли из Космоса // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2016. С. 279–280.

29. Ушенкин В.А. Формирование опорных данных для интерферометрической обработки радиолокационной информации на основе комплексирования низкодетальных цифровых моделей рельефа // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2016. С. 276–277.

30. Ушенкин В.А. Повышение точности опорной информации о высотах объектов земной поверхности на основе комплексирования цифровых моделей рельефа // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. 2017. Т.1. С. 179–184.

31. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли на основе привлечения опорной 3D-модели и анализа наблюдаемой сцены // Тезисы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. С. 128–129.

Ушенкин Виктор Андреевич

**АЛГОРИТМЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОТ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
НА ОСНОВЕ 3D-АНАЛИЗА НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.