УДК 004.932

Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ФАЗЫ

Рассматривается задача интерферометрической обработки радиолокационной информации на этапе развертывания фазы. Анализируются классические методы отсечения ветвей, потока минимальной стоимости и наименьших квадратов. Предлагается алгоритм развертывания фазы, основанный на комбинированном использовании основных идей указанных методов и позволяющий добиться большей точности в случаях, когда каждый из комбинируемых методов в отдельности приводит к значительным ошибкам.

Ключевые слова*: радиолокационная информация, интерферометрическая обработка, развертывание фазы, метод отсечения ветвей, метод потока минимальной стоимости, метод наименьших квадратов.*

Введение. Интерферометрическая обработка информации от систем радиолокационного наблюдения Земли является альтернативой стереофотограмметрической обработке [1,2,3] и позволяет получить данные о высоте точек земной поверхности в виде цифровой модели рельефа (ЦМР) путем анализа разности фаз сигнала двух радиолокационных изображений, полученных с близких орбит [4].

Наиболее нетривиальным этапом интерферометрической обработки является развертывание фазы, которое заключается в восстановлении истинной фазы φ_{rc} по ее свернутым значениям $\widetilde{\varphi}_{rc}$, определяемым функцией аргумента комплексного сигнала интерферограммы:

$$\widetilde{\varphi}_{rc} = \arg e^{j\varphi_{rc}}, \qquad (1)$$

где e – основание натурального логарифма, j – мнимая единица, r – номер строки, c – номер столбца интерферограммы.

В общем случае данная задача имеет бесконечное множество возможных решений: $\varphi_{rc} = \widetilde{\varphi}_{rc} + 2\pi k_{rc}$, $k_{rc} \in Z$, где Z – множество целых чисел. Однако истинная фаза φ_{rc} пропорциональна высоте рельефа, которая от пикселя к пикселю изменяется, как правило, медленно. Поэтому решение выбирается исходя из условия гладкости функции истинной фазы: $G_{rcx} = \varphi_{r,c+1} - \varphi_{rc} \in (-\pi, \pi]$ и $G_{rcy} = \varphi_{r+1,c} - \varphi_{rc} \in (-\pi, \pi]$. Если данное условие выполняется по всей интерферограмме, то градиент истинной фазы $\mathbf{G}_{rc} = (G_{rcx}, G_{rcy})$ равен градиенту $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc} = (\widetilde{G}_{rcx}, \widetilde{G}_{rcy})$, вычисляемому по свернутым значениям фазы:

$$\widetilde{G}_{rcx} = \arg e^{j(\widetilde{\varphi}_{r,c+1} - \widetilde{\varphi}_{rc})}, \; \widetilde{G}_{rcy} = \arg e^{j(\widetilde{\varphi}_{r+1,c} - \widetilde{\varphi}_{rc})}. \qquad (2)$$

В этом случае развертывание фазы выполняется однозначно с точностью до постоянной, кратной периоду, путем интегрирования свернутых градиентов фазы $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$.

Однако в большинстве случаев на реальных интерферограммах имеется небольшая доля пикселей, в которых $G_{rcx} \notin (-\pi, \pi]$ или $G_{rcy} \notin (-\pi, \pi]$. Наличие таких пикселей может быть вызвано сильными фазовыми шумами либо резкими изменениями высоты рельефа (обрывами, каньонами, крутыми горными склонами). Это приводит к тому, что поле градиента $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ перестает быть потенциальным, т.е. для отдельных значений r и c отличен от нуля результат интегрирования $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ вдоль замкнутого контура из четырех соседних пикселей:

$$\xi_{rc} = \widetilde{G}_{rcx} + \widetilde{G}_{r,c+1,y} - \widetilde{G}_{r+1,cx} - \widetilde{G}_{rcy}, \qquad (3)$$

а следовательно, результат развертывания фазы зависит от пути интегрирования.

Часть пикселей, в которых $G_{rcx} \notin (-\pi, \pi]$ или $G_{rcy} \notin (-\pi, \pi]$, лежит на контурах, которым соответствует $\xi_{rc} \neq 0$. Данные контуры называются сингулярными точками [5], и им приписывается положительный или отрицательный заряд в соответствии со знаком ξ_{rc}. Остальная часть указанных пикселей лежит на некоторых линиях, соединяющих две противоположно заряженные сингулярные точки, либо одну из них с границей интерферограммы, либо два участка границы.

Конкретное расположение линий зависит от сюжета, и в общем случае не существует критерия, позволяющего однозначно определить его. Поэтому в существующих методах развертывания фазы [6] используются те или иные предположения, позволяющие добиться результатов, близких к истинным значениям фазы, на некоторой части всех возможных сюжетов. Причем разные методы дают хорошие результаты в разных случаях. Также имеются сюжеты, на которых все существующие методы приводят к значительным ошибкам.

Цель работы – построение такого алгоритма развертывания фазы, основанного на комбинировании существующих методов, при котором каждый метод выполнял бы развертывание только на той части интерферограммы, на которой он способен отработать без существенных ошибок, а вся совокупность методов обеспечивала бы полное развертывание. Такое комбинирование позволит получать приемлемые результаты на гораздо большей доле всех возможных сюжетов, чем каждый метод в отдельности, и может послужить основой для повышения степени автоматизации процесса развертывания фазы.

Для достижения указанной цели следует проанализировать основные классические методы развертывания фазы (отсечения ветвей [7], потока минимальной стоимости [8] и наименьших квадратов [9]), выявить их сильные стороны и определить, при каких типах сигнала на интерферограмме они обеспечивают приемлемую точность.

Анализ метода отсечения ветвей. Ключевой идеей метода являются соединение сингулярных точек линиями отсечения и выбор пути интегрирования $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ таким образом, чтобы он не пересекал эти линии. Соединение сингулярных точек осуществляется с помощью «жадного» алгоритма [7], недостатком которого является зависимость результатов его работы от направления сканирования интерферограммы. Именно поэтому линиями отсечения соединяются сингулярные точки не только с противоположными, но и с одноименными зарядами. Это позволяет полностью изолировать от остальной интерферограммы области низкой когерентности, в которых из-за шумов сингулярные точки расположены очень часто и поэтому с большой вероятностью неправильно соединены линиями отсечения. В таких изолированных областях развертывание фазы не производится. Однако область низкой когерентности может оказаться изолированной не полностью, что может привести к ошибкам развертывания фазы на значительной части интерферограммы.

Тем не менее, «жадный» алгоритм работает очень быстро и позволяет правильно разбить сингулярные точки на пары для соединения их линиями отсечения, когда пары расположены редко, а точки в них находятся близко друг к другу и имеют противоположные заряды. Поэтому при комбинировании от метода отсечения ветвей можно взять идею разбиения сингулярных точек на пары с помощью «жадного» алгоритма.

Анализ метода потока минимальной стоимости. В данном методе производится восстановление градиента развернутой фазы $\mathbf{G}_{rc}$, обладающего свойством потенциальности, путем изменения на целое количество периодов значений $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$ в отдельных пикселях. По интерферограмме строится транспортная сеть, в которой положительно и отрицательно заряженным сингулярным точкам ставятся в соответствие источники и стоки. Коррекция значений $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$ на один период производится в пикселях, лежащих на пути проведения единицы потока от источника к стоку. Разбиение сингулярных точек на пары «источник – сток» и определение путей проведения потоков осуществляются путем решения задачи минимизации суммарной стоимости всех потоков. Под стоимостью потока понимается суммарная длина дуг транспортной сети, по которым он проходит.

Недостатком метода является чрезвычайно высокий объем вычислений, необходимый для минимизации суммарной стоимости потоков в транспортной сети, построенной по всей интерферограмме. Для типичных размеров радиолокационных интерферограмм обработка на современных компьютерах может занимать несколько суток. И поскольку при этом невозможно распараллеливание вычислений, заметного сокращения времени обработки с развитием вычислительной техники не предвидится.

В связи с высокой вычислительной сложностью алгоритмов поиска потока минимальной стоимости [10] на практике строят не единую транспортную сеть по всей интерферограмме, а несколько сетей по небольшим ее фрагментам. При этом задача минимизации стоимости потоков решается для каждой сети независимо. В результате время обработки сокращается до нескольких часов. Однако при таком подходе точность развертывания фазы заметно снижается и возникает вероятность несогласованности результатов на границе соседних фрагментов. Кроме того, даже минимизация стоимости потоков в сети, построенной по всей интерферограмме, не гарантирует правильного развертывания фазы. Наличие сильного фазового шума в областях низкой когерентности, а также сложных случаев отличий $\mathbf{G}_{rc}$ от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ из-за скачков высоты рельефа может привести к значительным ошибкам.

В то же время, по сравнению с методом отсечения ветвей, в данном случае производится более точное разбиение сингулярных точек на пары, поскольку при этом учитывается не только расстояние между точками, но и дополнительная информация, например наклон фазовой поверхности, амплитуда сигнала на исходных радиолокационных изображениях и частота сингулярных точек [11]. Учет дополнительной информации осуществляется путем задания соответствующих длин дугам транспортной сети.

Другим преимуществом метода является не игнорирование значений $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ вдоль линии, соединяющей пару сингулярных точек, а коррекция этих значений, позволяющая восстановить $\mathbf{G}_{rc}$.

Таким образом, при комбинировании от рассматриваемого метода целесообразно взять идею учета стоимости потока между сингулярными точками при разбиении их на пары, а также идею коррекции значений $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ вдоль пути проведения потока. При этом от минимизации суммарной стоимости потоков в сети следует отказаться.

Анализ метода наименьших квадратов. Ключевой идеей метода является построение фазовой поверхности, градиент которой максимально похож на $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ с точки зрения безвесового либо весового критерия наименьших квадратов.

При безвесовом критерии требуется небольшой объем вычислений, однако на многих сюжетах результирующая фазовая поверхность имеет паразитный наклон.

Значительно лучшие результаты обеспечивает весовой метод наименьших квадратов. При этом объем вычислений возрастает в N_u раз, где N_u – количество итераций, которое в зависимости от сложности сюжета может варьироваться от одной до нескольких сотен. Однако благодаря возможности распараллеливания вычислений обработка радиолокационной интерферограммы типичного размера занимает не более нескольких часов на современных компьютерах.

Веса для метода наименьших квадратов в работе [9] предлагается назначать в соответствии со значениями когерентности в пикселях интерферограммы. Это позволяет устранить влияние сильных фазовых шумов в областях низкой когерентности. При этом развернутая фаза в данных областях будет автоматически восстановлена по значениям фазы на их границах. Однако наличие сингулярных точек, вызванных редкими фазовыми шумами в областях средней и высокой когерентности, приводит к локальным искажениям результата развертывания, постепенно убывающим с расстоянием. При большом количестве сингулярных точек, вызванных резкими скачками высоты, возникает паразитный наклон поверхности развернутой фазы на значительной части интерферограммы.

В то же время, если дополнительно задать нулевые веса областям, в которых $\mathbf{G}_{rc}$ отличается от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ из-за резких скачков высоты, то в отсутствие редких фазовых шумов весовой метод наименьших квадратов способен правильно развернуть фазу в участках с ненулевыми весами. Исключение составляет случай, когда области с нулевым весом полностью изолируют друг от друга эти участки. В этом случае на интерферограмме не содержится информации о том, как соотносятся средние уровни фазы в изолированных участках. С точки зрения весового критерия наименьших квадратов результаты развертывания с любым соотношением средних уровней фазы равнозначны. Однако итерационные схемы Пикара и метода сопряженных градиентов [9], используемые при развертывании фазы, приводят к такому результату, при котором минимален наклон фазовой поверхности в области с нулевым весом. В ряде случаев такой результат не соответствует истинной фазе, однако более точное развертывание невозможно без привлечения дополнительной информации о соотношении средних уровней фазы на изолированных участках.

Комбинирование методов. Метод наименьших квадратов способен правильно развернуть фазу, если на интерферограмме предварительно будут устранены сингулярные точки, вызванные редкими фазовыми шумами и если будет разработан критерий выделения областей, в которых наблюдается отличие $\mathbf{G}_{rc}$ от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ из-за резких изменений высоты рельефа.

Устранение сингулярных точек, вызванных редкими фазовыми шумами, можно выполнить, скомбинировав идею разбиения сингулярных точек на пары с помощью «жадного» алгоритма [7] и идею проведения потока между парой противоположно заряженных сингулярных точек.

Таким образом, развертывание фазы сведется к нахождению значений G_{rcx} и G_{rcy} из условия:

$$\sum_{rc}\left(w_{rcx}(G_{rcx}-\hat{G}_{rcx})^2+w_{rcy}(G_{rcy}-\hat{G}_{rcy})^2\right)\to \min, \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{G}}_{rc}=(\hat{G}_{rcx},\hat{G}_{rcy})$ – вектор градиента фазы, полученный в результате работы «жадного» алгоритма [7], скомбинированного с проведением потока минимальной стоимости, а веса w_{rcx} и w_{rcy} задаются с учетом когерентности и результатов выделения областей резких изменений высоты.

Модификация «жадного» алгоритма. Алгоритм модифицируется, поскольку, во-первых, в нем линии отсечения могут проводиться между одноименно заряженными сингулярными точками, а во-вторых, разбиение точек на пары недостаточно надежно и сильно зависит от направления сканирования интерферограммы.

Основой для модификации является наблюдение, что объединение двух противоположно заряженных точек в пару тем надежней, чем меньше стоимость потока. Поэтому в модифицированном алгоритме пары формируются в первую очередь из точек, потоки между которыми наиболее «дешевы». Это осуществляется следующим образом.

При первом сканировании интерферограммы для каждой выявленной сингулярной точки ищется такой антипод (противоположно заряженная точка), чтобы стоимость потока между ними не превышала единицы. Когда длины дуг в сети не меньше единицы, стоимость потока не может быть меньше, чем расстояние в пикселях от источника до стока. Поэтому поиск антипода необходимо осуществлять на расстоянии не более одного пикселя от сингулярной точки. Если на данном расстоянии антипод не найден, продолжается сканирование интерферограммы. Если же антипод найден, необходимо проверить стоимость потока между ним и сингулярной точкой. Для этого в окрестности сингулярной точки с радиусом в один пиксель строится транспортная сеть. Если заряд точки положительный, то с помощью алгоритма Дейкстры [12] определяются расстояния от источника, соответствующего ей, до остальных узлов сети. Если расстояние до ближайшего стока не превышает единицу, то между источником и стоком проводится поток и вдоль пути его проведения корректируются значения $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$, за счет чего сингулярная точка и ее антипод взаимно устраняются. В противном случае поток не проводится и продолжается сканирование интерферограммы. Если сингулярная точка имеет отрицательный заряд, все действия выполняются аналогично, только вычисление расстояний производится от всех узлов сети до стока, соответствующего сингулярной точке.

При последующих сканированиях интерферограммы ограничение на максимальную стоимость проводимого потока увеличивается до двух, трех, четырех и так далее. Аналогичным образом увеличивается и радиус окрестности, в которой осуществляется поиск антипода и строится транспортная сеть. Общее количество сканирований интерферограммы ограничено максимальной стоимостью потока, при которой его проведение еще может быть целесообразным.

В результате работы алгоритма устраняются сингулярные точки, соответствующие редким фазовым шумам и простейшим случаям отличий $\mathbf{G}_{rc}$ от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ из-за резких скачков высоты рельефа. При этом остается небольшое количество неустраненных сингулярных точек. Они устраняются в результате выделения областей резких изменений высоты рельефа и дальнейшего развертывания фазы в соответствии с (4).

Модификация структуры транспортной сети. В методе потока минимальной стоимости используется транспортная сеть, показанная на рисунке 1, где квадратами обозначены пиксели интерферограммы, точками – узлы сети, стрелками – дуги. Данная сеть содержит минимально возможное количество дуг, что упрощает задачу поиска потока минимальной стоимости, но при этом она обладает одним недостатком.

Рассмотрим две противоположно заряженные сингулярные точки, лежащие на прямой, проходящей по диагонали. При единичных длинах дуг пути проведения потока между указанными точками, представленные на рисунке 2, имеют одинаковую длину и поэтому эквивалентны с точки зрения стоимости потока.

В случае когда длины дуг задаются в соответствии с наклоном фазовой поверхности, длина горизонтальной или вертикальной дуги тем больше, чем сильнее наклон в соответствующем направлении. Фаза, как правило, возрастает перпендикулярно к прямой, соединяющей сингулярные точки. Поэтому когда прямая расположена по диагонали, наклон фазовой поверхности в горизонтальном и вертикальном направлениях одинаков. Следовательно, будут равны длины вертикальных и горизонтальных дуг в окрестности сингулярных точек, а также стоимости потоков, проведенных по путям, представленным на рисунке 2. При этом стоимости потоков будут тем больше, чем сильнее наклон фазовой поверхности. Т.е. в случае крутого наклона стоимость потока будет большой даже при малом расстоянии между сингулярными точками, что может привести к ошибкам развертывания фазы.

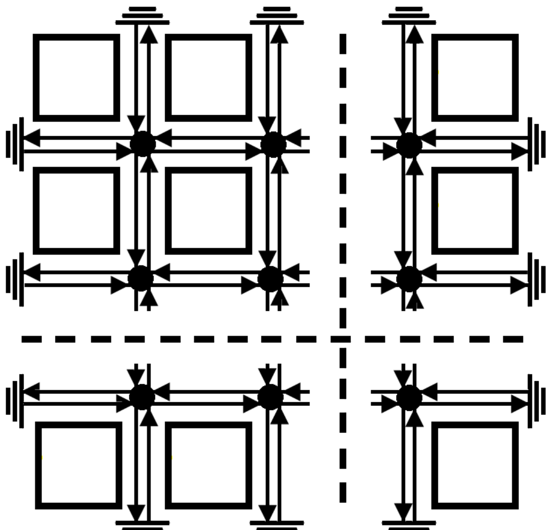


Рисунок 1 – Классическая структура сети

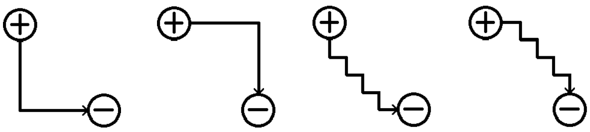


Рисунок 2 – Пути проведения потока

В то же время очевидно, что поток следует проводить в диагональном направлении, т.е. по одному из путей на рисунках 2, в и 2, г. При этом стоимость потока не должна быть большой.

Устранить указанный недостаток и понизить длину путей на рисунках 2, в и 2, г по сравнению с путями на рисунках 2, а и 2, б можно путем введения в структуру транспортной сети диагональных дуг (рисунок 3).

Проведение единицы потока через диагональную дугу с точки зрения коррекции $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$ эквивалентно проведению потока через вертикальную и горизонтальную дуги, смежные с ней. При этом в рассматриваемом случае двух сингулярных точек, расположенных по диагонали, длина диагональной дуги будет меньше, чем сумма длин смежных с ней вертикальной и горизонтальной.

Задание длин дугам транспортной сети. В связи с модификацией структуры транспортной сети необходимо пересмотреть задание длин ее дугам.

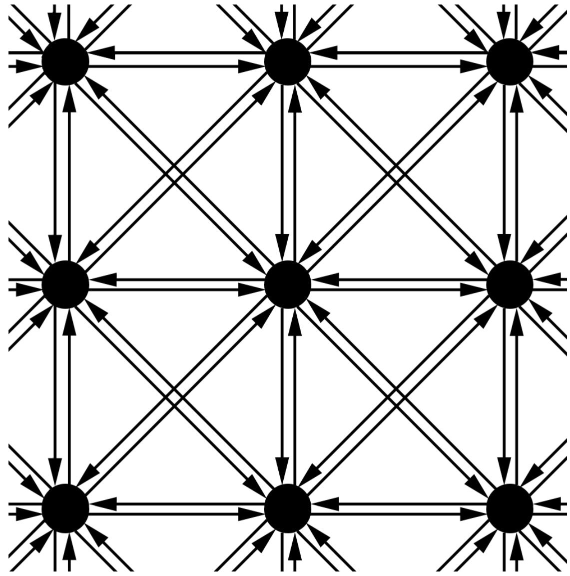


Рисунок 3 – Модифицированная структура сети

В основе задания длин дугам с учетом наклона фазовой поверхности лежит наблюдение, что линия сильных изменений истинных значений фазы проходит перпендикулярно к направлению наклона. Следовательно, для проведения потока возможны два направления: налево и направо от наклона фазовой поверхности. Из них будем выбирать такое направление, чтобы проведение потока приводило к увеличению модуля градиента фазы в результате коррекции $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$.

Наклон поверхности в некоторой точке можно выразить с помощью значений двух частных производных. Поскольку фазовая поверхность на этапе развертывания неизвестна, ее наклон можно оценить лишь приближенно.

В работе [11] предлагается оценивать наклон фазовой поверхности по положению максимума амплитудного спектра сигнала фрагмента интерферограммы. Однако данный подход не позволяет зафиксировать слабый наклон при небольшом размере фрагмента. Поэтому целесообразно оценивать наклон фазовой поверхности путем медианной фильтрации $\widetilde{G}_{rcx}$ и $\widetilde{G}_{rcy}$. Фильтрация необходима для устранения влияния фазового шума.

Таким образом, приближенными оценками значений частных производных фазовой поверхности могут служить $\overline{G}_{rcx}$ и $\overline{G}_{rcy}$:

$$\overline{G}_{rcx} = Me\{\widetilde{G}_{r+p,c+q,x};\, p=\overline{-W,W},\, q=\overline{-W,W}\},$$
$$\overline{G}_{rcy} = Me\{\widetilde{G}_{r+p,c+q,y};\, p=\overline{-W,W},\, q=\overline{-W,W}\}, \quad (5)$$

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

Длины w_{1rcx}, w_{2rcx}, w_{1rcy} и w_{2rcy} вертикальных и горизонтальных дуг, направленных из rc-го узла соответственно вниз, вверх, влево и вправо, будем задавать с учетом $\overline{G}_{rcx}$ и $\overline{G}_{rcy}$ следующим образом:

$$w_{1rcx} = \begin{cases} 1+K\left|\overline{G}_{rcy}\right|, & \overline{G}_{rcx} \le 0, \\ (1+K\left|\overline{G}_{rcy}\right|)(1+K\overline{G}_{rcx}), & \overline{G}_{rcx} > 0; \end{cases}$$
$$w_{2rcx} = \begin{cases} 1+K\left|\overline{G}_{rcy}\right|, & \overline{G}_{rcx} > 0, \\ (1+K\left|\overline{G}_{rcy}\right|)(1-K\overline{G}_{rcx}), & \overline{G}_{rcx} \le 0; \end{cases}$$
$$w_{1rcy} = \begin{cases} 1+K\left|\overline{G}_{rcx}\right|, & \overline{G}_{rcy} \le 0, \\ (1+K\left|\overline{G}_{rcx}\right|)(1+K\overline{G}_{rcy}), & \overline{G}_{rcy} > 0; \end{cases}$$
$$w_{2rcy} = \begin{cases} 1+K\left|\overline{G}_{rcx}\right|, & \overline{G}_{rcy} > 0, \\ (1+K\left|\overline{G}_{rcx}\right|)(1-K\overline{G}_{rcy}), & \overline{G}_{rcy} \le 0, \end{cases} \quad (6)$$

где K – коэффициент чувствительности длин дуг к наклону фазовой поверхности. Минимальная длина вертикальных и горизонтальных дуг равна единице.

Длины диагональных дуг должны определяться в соответствии с тем, насколько близко направление наклона фазы к диагональному. При этом их минимальная длина должна быть как у диагонали единичного квадрата, то есть $\sqrt{2}$.

В случае когда $\overline{G}_{rcx} \le 0$ и $\overline{G}_{rcy} \le 0$, длины w_{1rcd}, w_{2rcd}, w_{3rcd}, w_{4rcd} диагональных дуг, направленных из rc-го узла соответственно влево и вверх, вправо и вверх, вправо и вниз, влево и вниз, задаются следующим образом:

$$w_{1rcd} = w_{2rcd} = w_{3rcd} = \frac{(w_{1rcy} + w_{1rcx})\max(w_{1rcy}, w_{1rcx})}{\sqrt{2}\min(w_{1rcy}, w_{1rcx})},$$
$$w_{4rcd} = \frac{\sqrt{2}\max(w_{1rcy}, w_{1rcx})}{\min(w_{1rcy}, w_{1rcx})}. \quad (7)$$

При $\overline{G}_{rcx} \le 0$ и $\overline{G}_{rcy} > 0$:

$$w_{1rcd} = w_{2rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{2rcy} + w_{1rcx})\max(w_{2rcy}, w_{1rcx})}{\sqrt{2}\min(w_{2rcy}, w_{1rcx})},$$
$$w_{3rcd} = \frac{\sqrt{2}\max(w_{2rcy}, w_{1rcx})}{\min(w_{2rcy}, w_{1rcx})}. \quad (8)$$

При $\overline{G}_{rcx} > 0$ и $\overline{G}_{rcy} \le 0$:

$$w_{2rcd} = w_{3rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{1rcy} + w_{2rcx})\max(w_{1rcy}, w_{2rcx})}{\sqrt{2}\min(w_{1rcy}, w_{2rcx})},$$
$$w_{1rcd} = \frac{\sqrt{2}\max(w_{1rcy}, w_{2rcx})}{\min(w_{1rcy}, w_{2rcx})}. \quad (9)$$

При $\overline{G}_{rcx} > 0$ и $\overline{G}_{rcy} > 0$:

$$w_{2rcd} = w_{3rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{2rcy} + w_{2rcx})\max(w_{2rcy}, w_{2rcx})}{\sqrt{2}\min(w_{2rcy}, w_{2rcx})},$$
$$w_{2rcd} = \frac{\sqrt{2}\max(w_{2rcy}, w_{2rcx})}{\min(w_{2rcy}, w_{2rcx})}. \quad (10)$$

Поскольку при последующем развертывании фазы в соответствии с (4) значения $\hat{\mathbf{G}}_{rc}$ в областях низкой когерентности будут игнорироваться, при задании длин дугам транспортной сети нет смысла учитывать плотность сингулярных точек и амплитуду сигнала на исходных радиолокационных изображениях. Высокая плотность сингулярных точек и низкая амплитуда сигнала, характерные для областей низкой когерентности, с большой вероятностью могут привести к ошибочному выбору пар «источник – сток» для проведения потока. Поэтому целесообразно проигнорировать сингулярные точки в областях низкой когерентности, заменив землей фрагменты транспортной сети, соответствующие этим областям (рисунок 4).

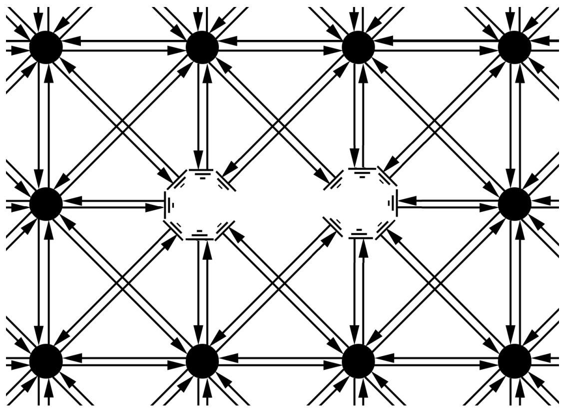


Рисунок 4 – Замена землей фрагментов сети

Коррекция градиента фазы. С учетом диагональных дуг, введенных в структуру транспортной сети, коррекция градиента фазы в соответствии с проведенными потоками примет вид:

$$\hat{G}_{rcx} = \widetilde{G}_{rcx} + 2\pi(k_{1,r-1,cx} - k_{2rcx} + $$
$$+ k_{4,r-1,cd} + k_{3,r-1,c-1,d} - k_{2rcd} - k_{1r,c+1,d}),$$
$$\hat{G}_{rcy} = \widetilde{G}_{rcy} + 2\pi(k_{1rcy} - k_{2r,c-1,y} +$$

$$+k_{4,r-1,c,d}-k_{3r,c-1,d}-k_{2,r+1,c-1,d}+k_{1rcd}), \qquad (11)$$

где k_{1rcx}, k_{2rcx}, k_{1rcy}, k_{2rcy}, k_{1rcd}, k_{2rcd}, k_{3rcd} и k_{4rcd} – количество единиц потока в соответствующих дугах сети, образованное после проведения потоков между всеми парами «источник – сток», сформированными модификацией «жадного» алгоритма [7].

Критерий выделения областей резких изменений высоты рельефа. В основе предлагаемого критерия лежит наблюдение, что в областях резких скачков высоты рельефа значительно изменяются от пикселя к пикселю модуль и направление вектора $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$.

Помимо резких скачков высоты рельефа, сильные изменения вектора $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ могут быть также вызваны фазовыми шумами. Поэтому при выделении областей, как и при задании длин дугам транспортной сети, необходимо анализировать отфильтрованный свернутый градиент $\overline{\mathbf{G}}_{rc}=(\overline{G}_{rcx},\overline{G}_{rcy})$.

Относительное сходство модуля и направления двух векторов градиента $\mathbf{G}_1$ и $\mathbf{G}_2$ можно оценить с помощью функции:

$$s(\mathbf{G}_1,\mathbf{G}_2)=\begin{cases}\dfrac{\mathbf{G}_1\mathbf{G}_2}{2G^2}+\dfrac{1}{2}, & G>0;\\ 1, & G=0,\end{cases} \qquad (12)$$

где $G=\max(|\mathbf{G}_1|,|\mathbf{G}_2|)$.

Возможные значения $s(\mathbf{G}_1,\mathbf{G}_2)$ лежат на отрезке $[0,1]$. Функция принимает единичное значение, когда векторы равны, и нулевое, когда они противоположно направлены или когда один вектор нулевой, а другой отличен от нуля.

Однако, помимо относительных отличий модуля и направления двух градиентов, необходимо также учесть и абсолютные значения их модулей. Если значительно отличаются два небольших по модулю градиента, то их отличия, скорее всего, вызваны не полностью подавленными фильтрацией шумами или небольшими вариациями истинной фазы от пикселя к пикселю. Поэтому сходство двух векторов градиента можно оценить с помощью функции:

$$\widetilde{s}(\mathbf{G}_1,\mathbf{G}_2)=\begin{cases}s(\mathbf{G}_1,\mathbf{G}_2), & G>G_{\text{в}};\\ (s(\mathbf{G}_1,\mathbf{G}_2)-1)\times\\ \times\dfrac{G-\mathrm{G}_{\text{н}}}{\mathrm{G}_{\text{в}}-\mathrm{G}_{\text{н}}}+1, & \mathrm{G}_{\text{н}}<G\le G_{\text{в}};\\ 1, & G\le \mathrm{G}_{\text{н}},\end{cases} \qquad (13)$$

где $\mathrm{G}_{\text{н}}$ и $G_{\text{в}}$ – пороговые значения. Градиенты, не превосходящие по модулю порог $\mathrm{G}_{\text{н}}$, считаются одинаковыми. Если хотя бы один из градиентов превосходит по модулю порог $G_{\text{в}}$, их сходство оценивается с помощью функции (12).

Значения градиентов $\mathbf{G}_1$ и $\mathbf{G}_2$ берутся в двух пикселях интерферограммы, расположенных поблизости: $\mathbf{G}_1=\overline{\mathbf{G}}_{rc}$, $\mathbf{G}_2=\overline{\mathbf{G}}_{r+p,c+q}$. При этом прямая, соединяющая пиксели, должна быть перпендикулярна к градиенту $\mathbf{G}_1$: $(q,p)\perp\overline{\mathbf{G}}_{rc}$. Это позволяет учитывать не постепенное изменение крутизны наклона, а резкие изгибы фазовой поверхности, именно в которых чаще всего и наблюдается отличие $\mathbf{G}_{rc}$ от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$. Среди всех значений $\widetilde{s}(\overline{\mathbf{G}}_{rc},\overline{\mathbf{G}}_{r+p,c+q})$, вычисленных в окрестности пикселя интерферограммы с радиусом W, выбирается минимальное:

$$\widetilde{s}_{rc}=\min\{\widetilde{s}(\overline{\mathbf{G}}_{rc},\overline{\mathbf{G}}_{r+p,c+q});$$
$$(q,p)\perp\overline{\mathbf{G}}_{rc},\ |q|<W,\ |p|<W\}. \qquad (14)$$

Если $\widetilde{s}_{rc}<\widetilde{s}_{\text{н}}$, где $\widetilde{s}_{\text{н}}$ – некоторый порог, то производится выделение rc-го пикселя интерферограммы, поскольку в нем наиболее вероятно отличие $\mathbf{G}_{rc}$ от $\widetilde{\mathbf{G}}_{rc}$ из-за резкого скачка высоты.

Задание весов для развертывания по методу наименьших квадратов. Веса w_{rcx} и w_{rcy} задаются в соответствии со значениями когерентности γ_{rc}, полученными на предыдущих этапах интерферометрической обработки [13], и предложенным критерием (14):

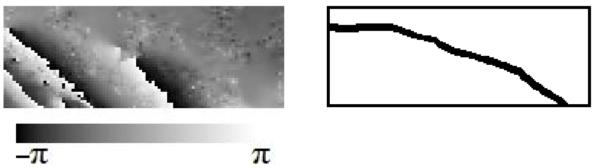
$$w_{rcx}=\min(w_{rc},w_{r,c+1}),$$
$$w_{rcy}=\min(w_{rc},w_{r+1,c}), \qquad (15)$$

где $w_{rc}=\begin{cases}0, & \widetilde{s}_{rc}<\widetilde{s}_{\text{н}} \text{ или } \gamma_{rc}<\gamma_{\text{н}};\\ \dfrac{\gamma_{rc}-\gamma_{\text{н}}}{\gamma_{\text{в}}-\gamma_{\text{н}}}, & \widetilde{s}_{rc}\ge\widetilde{s}_{\min} \text{ и } \gamma_{\text{н}}\le\gamma_{rc}\le\gamma_{\text{в}};\\ 1, & \widetilde{s}_{rc}\ge\widetilde{s}_{\min} \text{ и } \gamma_{rc}>\gamma_{\text{в}},\end{cases}$

$\gamma_{\text{н}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ – пороги, разделяющие низкую, среднюю и высокую когерентность.

Для иллюстрации работы критерия (14) рассмотрим фрагмент интерферограммы (рисунок 5, а). В верхней правой части фрагмента фаза практически неизменна, а в нижней левой – возрастает в направлении направо и вверх. На границе этих двух частей наблюдается резкое уменьшение модуля $\overline{\mathbf{G}}_{rc}$, поэтому она выделяется в соответствии с предложенным критерием (рисунок 5, б).

Следует отметить, что ни метод отсечения ветвей, ни метод потока минимальной стоимости не способны правильно развернуть фазу на приведенном фрагменте. Сингулярные точки, расположенные на выделенной границе, имеют одинаковые заряды. Соответствующие им антиподы расположены далеко за пределами фрагмента. Поэтому указанные методы найдут этим точкам пары среди расположенных неподалеку сингулярных точек, вызванных фазовыми шумами.



а б

Рисунок 5 – Фрагмент интерферограммы и область резких изменений фазы

Поскольку когерентность сигнала на приведенном фрагменте высокая, то классические весовой и безвесовой методы наименьших квадратов приведут к практически одинаковым результатам, содержащим сильный паразитный наклон фазы в направлении, перпендикулярном к линии, представленной на рисунке 5, б.

В то же время за счет комбинирования и модификации методов можно добиться приемлемых результатов развертывания фазы на данном фрагменте. Сингулярные точки, вызванные фазовыми шумами, будут объединены в пары в первую очередь в соответствии с предложенной модификацией «жадного» алгоритма [7]. Точки, расположенные в области, выделенной черным цветом на рисунке 5, б, останутся несоединенными, но, благодаря предложенному критерию, они будут проигнорированы в методе наименьших квадратов. В результате фаза в двух частях фрагмента будет развернута независимо и в рамках каждой части правильно. Некорректно может быть восстановлено только соотношение средних уровней фазы в изолированных частях. Однако, если для каждой части найдется хотя бы по одной опорной точке с известной высотой, истинное соотношение можно будет восстановить при дальнейшей обработке.

Алгоритм развертывания фазы. Предлагаемый алгоритм включает следующие шаги.

Шаг 1. Расчет $\tilde{\mathbf{G}}_{rc}$ в соответствии с (2).

Шаг 2. Медианная фильтрация $\tilde{\mathbf{G}}_{rc}$ с получением $\overline{\mathbf{G}}_{rc}$ в соответствии с (5).

Шаг 3. Расчет длин дуг транспортной сети с использованием (6) – (10).

Шаг 4. Разбиение сингулярных точек на пары в соответствии с модифицированным «жадным» алгоритмом [7], проведение потоков и получение скорректированного градиента фазы $\hat{\mathbf{G}}_{rc}$ по (11).

Шаг 5. Расчет значений $\tilde{s}_{rc}$ по (14).

Шаг 6. Задание весов w_{rcx} и w_{rcy} по (15).

Шаг 7. Развертывание фазы по методу наименьших квадратов в соответствии с (4).

Экспериментальные исследования. Для экспериментальных исследований развертывания фазы выбраны следующие интерферограммы с различными типами сюжета:

1) интерферограмма плато Колорадо, США, сформированная по двум изображениям, полученным космическим аппаратом TerraSAR-X в режиме StripMap 10 и 21 марта 2008 г. (рисунок 6, а);

2) интерферограмма города Финикс, США, сформированная по двум изображениям, полученным космическим аппаратом RadarSat-2 в режиме UltraFine 4 и 28 мая 2008 г. (рисунок 6, б);

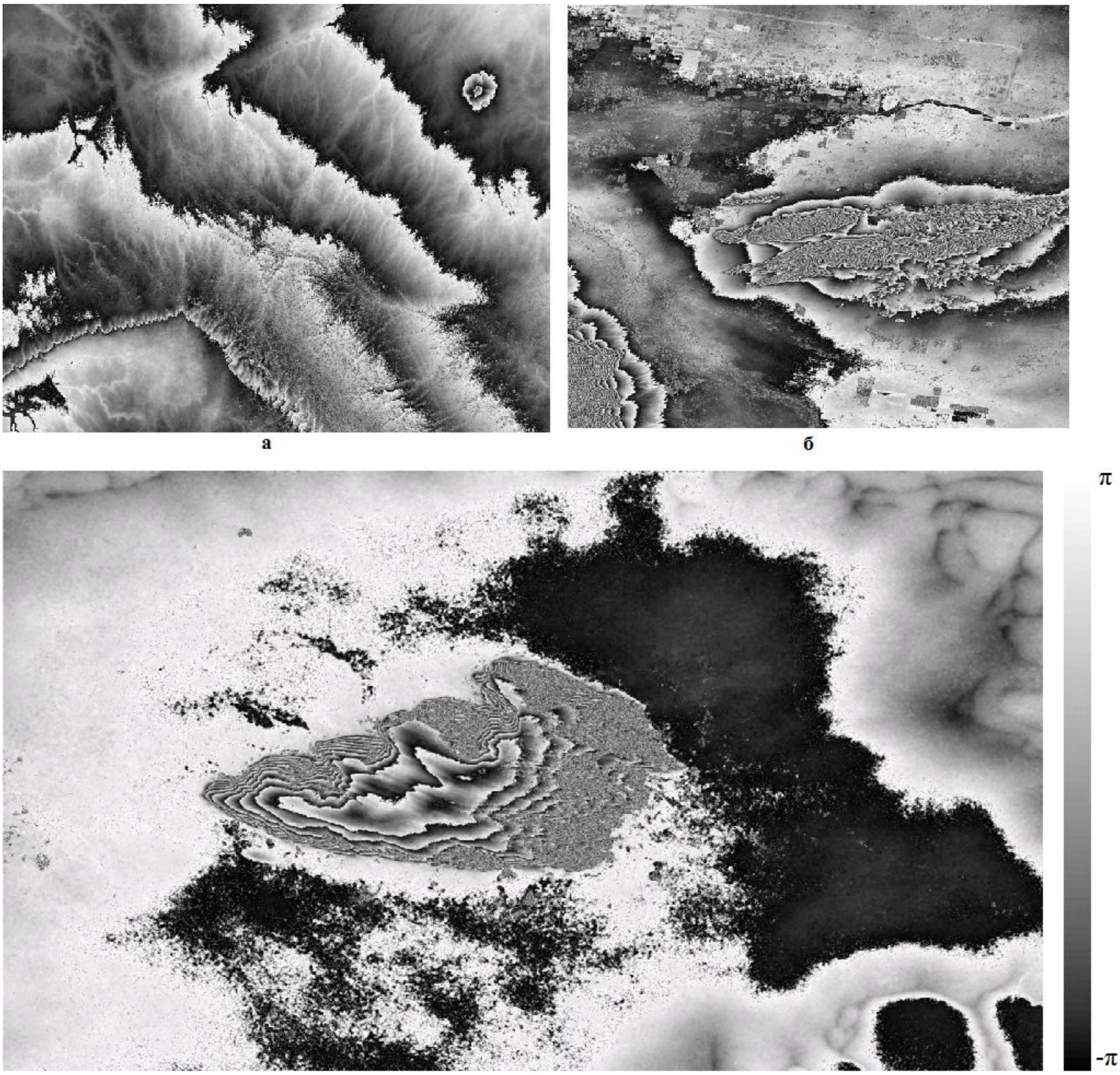
3) интерферограмма заповедника Улуру, США, сформированная по двум изображениям, полученным космическим аппаратом TerraSAR-X в режиме SpotLight 12 и 23 февраля 2009 г. (рисунок 6, в).

Развертывание фазы осуществлялось с помощью метода отсечения ветвей (рисунки 7, а, 8, а, 9, а), метода потока минимальной стоимости (рисунки 7, б, 8, б, 9, б), безвесового метода наименьших квадратов (рисунки 7, в, 8, в, 9, в), весового метода наименьших квадратов (рисунки 7, г, 8, г, 9, г) и предложенного алгоритма (рисунки 7, д, 8, д, 9, д). Для исследования методов отсечения ветвей и потока минимальной стоимости использовалась их реализация в программном пакете GAMMA SAR and Interferometry Software. Метод отсечения ветвей не развернул фазу в областях низкой когерентности, показанных на рисунках 7, а, 8, а, 9, а белым цветом.

Для количественной оценки точности развертывания фазы использовалось среднеквадратичное отклонение (СКО) результата от фазы опорного рельефа, полученной из глобальной ЦМР низкого разрешения SRTM3. При этом средние уровни развернутой и опорной фазы выравнивались. Результаты оценки точности приведены в таблице.

Среднеквадратичное отклонение развернутой фазы от фазы опорного рельефа

Интерферограмма	Метод/алгоритм развертывания фазы				
	Метод отсечения ветвей	Метод потока минимальной стоимости	Безвесовой метод наименьших квадратов	Весовой метод наименьших квадратов	Предложенный алгоритм
Заповедник Улуру	2π	2.1π	5.5π	2.7π	1.5π
Город Финикс	2.8π	0.7π	9.5π	2.8π	0.34π
Плато Колорадо	0.22π	0.29π	3.8π	0.38π	0.23π



в

Рисунок 6 – Интерферограммы

Поскольку на исходных интерферограммах присутствуют фазовые шумы, а на ЦМР низкого разрешения отсутствуют мелкие детали рельефа, абсолютно точному развертыванию фазы соответствует СКО не нулевое, а порядка 0.2π.

Безвесовой метод наименьших квадратов на всех интерферограммах привел к неудовлетворительным результатам и в дальнейшем сравнении рассматриваться не будет.

Интерферограмма плато Колорадо не содержит сингулярных точек, вызванных резкими изменениями высоты рельефа. Сингулярные точки на ней обусловлены только шумами. Поэтому и классические методы, и предложенный алгоритм обеспечили на данном сюжете высокую точность развертывания. СКО для различных методов отличаются на сотые доли периода из-за разной точности восстановления истинной фазы в окрестности шумов. Минимальное СКО – у метода отсечения ветвей, поскольку он не развернул фазу в наиболее зашумленных областях и оценка точности в них не выполнялась. Наиболее точный результат, полученный для всей интерферограммы, обеспечил предложенный алгоритм, поскольку он сочетает восстановление градиента фазы в окрестности редких шумов и игнорирование наиболее сильного шума в областях низкой когерентности.

На интерферограмме города Финикс наблюдаются относительно простые случаи резких изменений высоты на отдельных участках горных склонов. Метод отсечения ветвей не смог правильно провести линии отсечения на таких участках, в результате чего возникли значительные ошибки развертывания фазы в нижней части интерферограммы. Метод потока минимальной стоимости в целом правильно восстановил фазу на крутых горных склонах, за исключением центральной части интерферограммы. Весовой метод наименьших квадратов внес в развернутую фазовую поверхность сильный паразитный наклон. Предложенный алгоритм развернул фазу правильно на всей интерферограмме, кроме отдельных локальных областей радиусом в несколько десятков пикселей. С учетом завышения оценки СКО на 0.2π получаем, что предложенный алгоритм на данном сюжете обеспечил в 3.5 раза большую точность, чем лучший из классических методов.

На интерферограмме заповедника Улуру наблюдается наиболее сложный случай резкого изменения высоты рельефа от пикселя к пикселю, поскольку склоны скалы, расположенной в центре интерферограммы, почти отвесные. И классические методы, и предложенный алгоритм развернули фазу на данном сюжете с достаточно большими ошибками. Тем не менее, точность предложенного алгоритма на 30 % выше, чем у лучшего из классических методов, которые неправильно развернули фазу как на скале, так и на окружающей ее местности. В то же время предложенный алгоритм изолировал скалу областями нулевого веса, что позволило правильно развернуть фазу на окружающей местности. Относительные изменения фазы на скале восстановлены в целом правильно, но занижено на два периода отличие средних уровней фазы на скале и окружающей местности. Именно это занижение и явилось причиной СКО порядка 1.5π. Однако за счет изоляции скалы от окружающей местности имеется возможность устранения этой ошибки на следующем этапе интерферометрической обработки. Для этого необходимо пересчитывать фазу в высоту независимо для каждого изолированного участка интерферограммы. Соотношение средних высот на изолированных участка при этом можно определить из опорной ЦМР низкого разрешения.

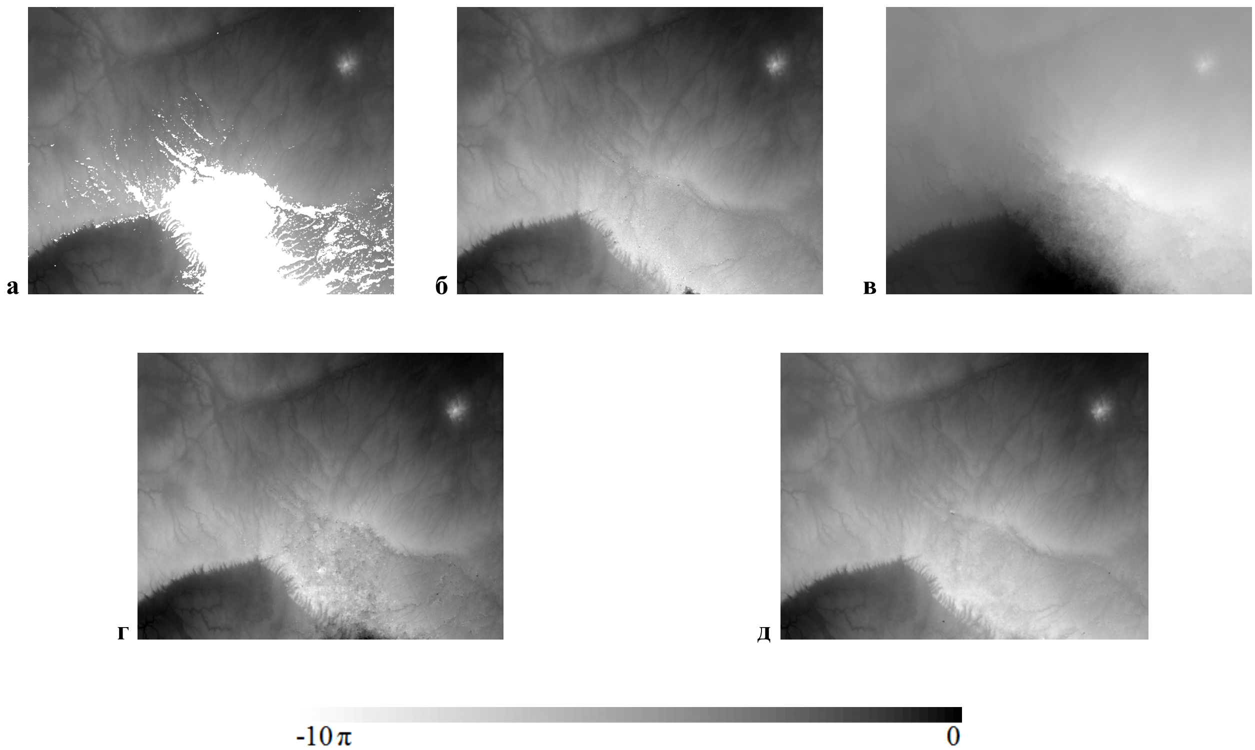


Рисунок 7 – Результаты развертывания фазы интерферограммы плато Колорадо

Заключение. Предложенный алгоритм, основанный на комбинировании и модификации классических методов, позволяет сохранить высокую точность развертывания фазы на тех сюжетах, на которых классические методы обеспечивают приемлемый результат, и повысить точность на тех сюжетах, на которых каждый из комбинируемых методов в отдельности приводит к значительным ошибкам. Коэффициент увеличения точности зависит от сложности сюжета и может варьироваться от 1.3 до 3.5. При этом основные ошибки развертывания фазы предложенным алгоритмом заключаются в неправильном определении соотношения средних уровней фазы на изолированных фрагментах интерферограммы и могут быть автоматически устранены на следующем этапе интерферометрической обработки путем независимого пересчета фазы в высоту для каждого изолированного фрагмента. Таким образом, доля всех возможных сюжетов, на которых обеспечивается приемлемая точность, увеличивается по сравнению с каждым из комбинируемых методов, что позволяет уменьшить участие оператора и повысить степень автоматизации процесса интерферометрической обработки радиолокационной информации.

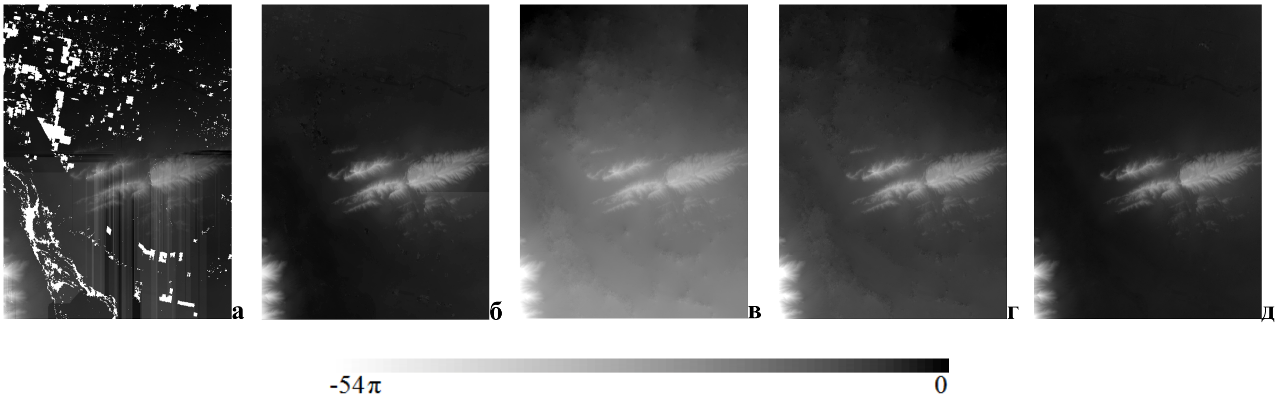


Рисунок 8 – Результаты развертывания фазы интерферограммы города Финикс

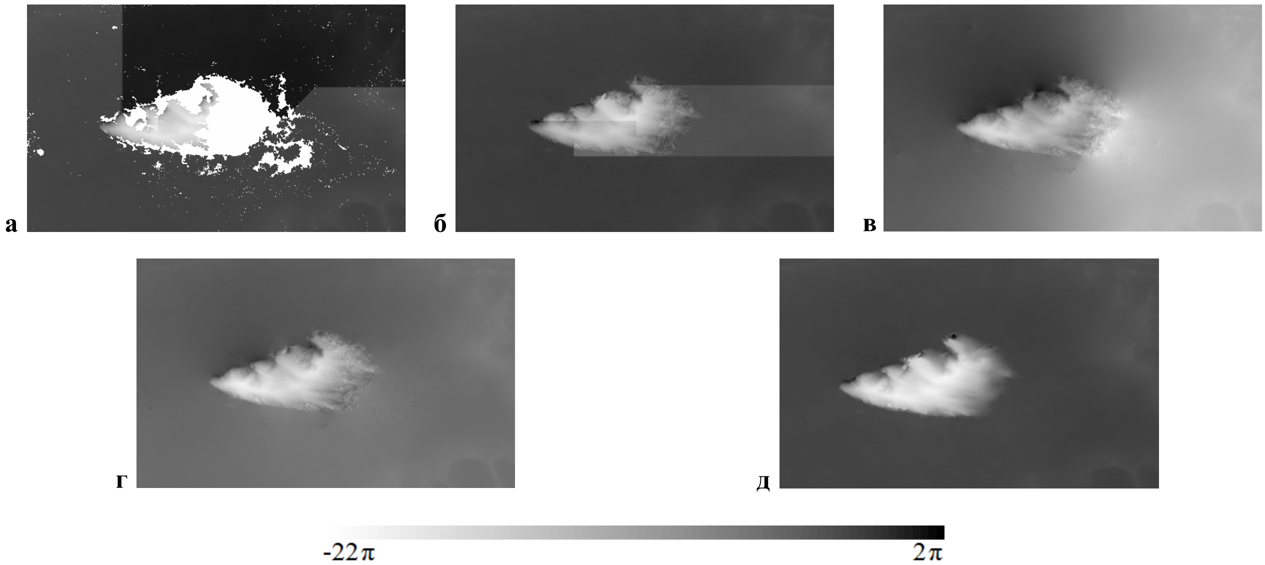


Рисунок 9 – Результаты развертывания фазы интерферограммы заповедника Улуру

Библиографический список

1. *Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И.* Программно-математическое обеспечение системы обработки космических стереоизображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 27. С. 17-22.

2. *Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И.* Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 44-49.

3. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под. ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.

4. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под. ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

5. *Шувалов Р.И.* Алгоритм метода функций Грина для задачи развертки фазы на плоскости // Электронный научный вестник МГГУ. 2011. №2. С.101-113.

6. *Сосновский А.В., Коберниченко В.Г.* Исследование алгоритмов развертывания фазы при формировании цифровых моделей местности методом космической радиолокационной интерферометрии // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. Т. 7. С. 84-92.

7. *Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L.* Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // Radio Science. 1988. Vol. 23. No. 4. P. 713-720.

8. *Constantini M.* A novel phase unwrapping method based on network programming // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36. No. 3. P. 813-821.

9. *Ghiglia D.C., Romero L.A.* Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. Vol. 11. No. 1. P. 107-117.

10. *Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B.* Network flows: Theory, algorithms, and applications. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 864 p.

11. *Eineder M., Hubig M., Milcke B.* Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm // IGARSS'98 Proceedings. 1998. Vol. 1. P. 83-87.

12. *Dijkstra E.W.* A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. P. 269-271.

13. *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.