

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2016 В. А. Ушенкин, Н. А. Егошкин

Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань

В статье исследуются подходы к использованию априорной информации о рельефе для повышения качества интерферометрической обработки данных от космических систем радиолокационного наблюдения Земли. Анализируется влияние рельефа на характер геометрического соответствия радиолокационных изображений и предлагается алгоритм быстрого и высокоточного их совмещения на основе полиномиальной аппроксимации влияния высоты рельефа. Показана необходимость уточнения перпендикулярной интерферометрической базы при современной точности навигационной информации, а также необходимость учёта рельефа. Обосновывается целесообразность двухэтапного уточнения базы: перед и после развёртывания фазы. Определяется влияние крутизны наклона рельефа на оценку когерентности. Анализируются существующие методы развёртывания фазы и предлагается алгоритм их комбинирования на основе априорной информации о характере сигнала на интерферограмме, при котором соответствующий метод способен развернуть фазу без значительных ошибок. Предлагается критерий выделения на интерферограмме областей, в которых от пикселя к пикселю наблюдаются сильные фазовые скачки, обусловленные крутым наклоном рельефа. Рассматривается процесс пересчёта фазы в высоту. Предлагается в качестве априорной информации использовать при интерферометрической обработке глобальные цифровые модели рельефа низкого разрешения, имеющиеся в открытом доступе.

Интерферометрическая обработка, радиолокационное изображение, интерферограмма, цифровая модель рельефа, когерентность, интерферометрическая база, развёртывание фазы.

Введение

Интерферометрическая обработка информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли позволяет извлечь данные о высоте точек земной поверхности из разности фаз сигнала двух радиолокационных изображений (РЛИЗ), полученных с близких орбит. Её продуктами являются цифровые модели рельефа (ЦМР). Обработка включает в себя следующие основные этапы:

- 1) определение параметров геометрического соответствия двух РЛИЗ;
- 2) трансформацию дополнительного РЛИЗ в координаты основного;
- 3) формирование фазоразностного изображения – интерферограммы;
- 4) расчёт интерферометрической базы;

5) вычитание из интерферограммы фазы плоского рельефа с учётом интерферометрической базы;

6) оценку когерентности – степени зашумлённости фазы на интерферограмме;

7) фильтрацию шумов на интерферограмме;

8) развёртывание фазы – восстановление истинных её значений из свёрнутых по модулю 2π ;

9) пересчёт развёрнутой фазы в высоту с учётом интерферометрической базы;

10) трансформацию полученной матрицы высот в заданную картографическую проекцию.

Цитирование: 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. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-208-219

Погрешности промежуточных результатов на выходе каждого этапа приводят к снижению точности конечного продукта или даже к невозможности выполнения дальнейших этапов обработки. Одним из факторов, приводящих к погрешностям, является влияние рельефа. Таким образом, для получения высокоточной ЦМР может потребоваться априорное знание рельефа.

Цель работы – исследовать целесообразность использования априорной информации при интерферометрической обработке и проанализировать глобальные ЦМР низкого разрешения, имеющиеся в открытом доступе, на пригодность для использования в качестве априорной информации о рельефе.

Влияние рельефа на геометрическое соответствие РЛИЗ

При интерферометрической обработке требуется совмещение исходных РЛИЗ с точностью до десятых долей пикселя. В противном случае наблюдается значимое снижение когерентности сигнала на интерферограмме. При значительных ошибках совмещения когерентность может снизиться практически до нуля, в результате чего выполнение последующих этапов обработки окажется невозможным.

Точность совмещения определяется адекватностью математической модели

геометрического соответствия двух РЛИЗ и точностью определения её параметров. При интерферометрической обработке РЛИЗ среднего и низкого разрешения традиционно применялась полиномиальная модель [1]:

$$\begin{aligned} R_2(R_1, a_1) &= \sum_{\substack{i \geq 0, j \geq 0, \\ i+j \leq N}} k_{Rij} R_1^i a_1^j, \\ a_2(R_1, a_1) &= \sum_{\substack{i \geq 0, j \geq 0, \\ i+j \leq N}} k_{aij} R_1^i a_1^j, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – наклонные дальности, определяющие позиции объекта в строках соответствующих РЛИЗ; a_1 и a_2 – азимуты, определяющие позиции в столбцах РЛИЗ; k_{Rij} и k_{aij} – коэффициенты полиномов; N – степень полинома.

Полиномиальная модель [1] адекватно описывает геометрическое соответствие РЛИЗ, когда относительно невелики перепад высоты рельефа, перпендикулярная интерферометрическая база B_{\perp} или пространственное разрешение РЛИЗ. Зависимость максимальной ошибки совмещения от перепада высоты при различных B_{\perp} представлена на рис. 1. При расчёте зависимостей использовались средний радиус Земли, высота орбиты 500 км и наклонная дальность 700 км.

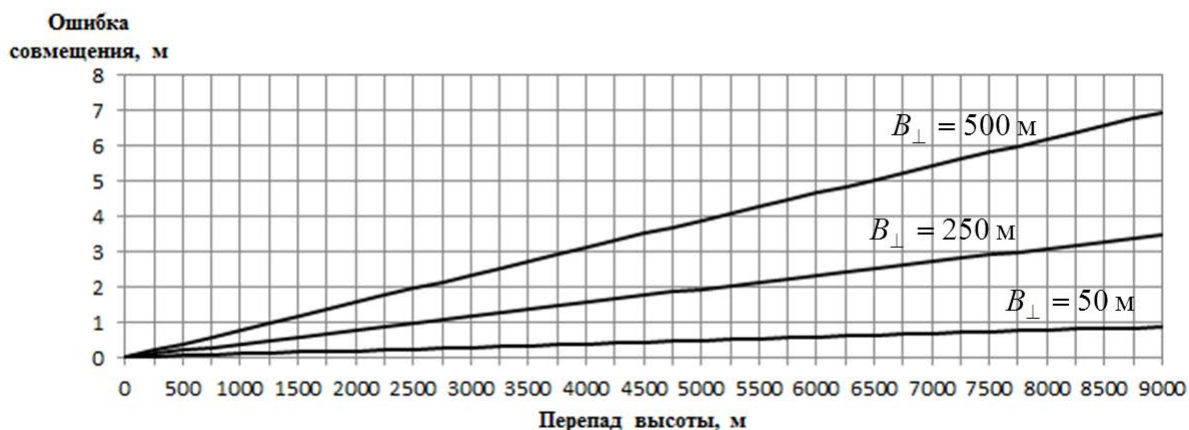


Рис. 1. Зависимость ошибки совмещения РЛИЗ полиномиальной моделью от перепада высоты рельефа

Современные космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) в маршрутном режиме съёмки обеспечивают пространственное разрешение порядка 3 м, а в прожекторном режиме – 1 м. Следовательно для достижения точности совмещения порядка десятой доли пикселя необходимо, чтобы ошибка не превышала 0,3 м для маршрутного режима и 0,1 м для прожекторного. Из рис. 1 видно, что при километровых перепадах высоты рельефа, характерных для горной местности, полиномиальная модель [1] не способна обеспечить требуемую точность совмещения.

Замена полиномов в модели [1] на более сложные функции не приводит к повышению точности совмещения, поскольку при этом резко возрастают погрешности оценивания параметров модели из-за ошибок корреляционно-экстремального отождествления, вызванных спекл-шумом – характерной особенностью РЛИЗ.

Таким образом, при совмещении целесообразно использовать модели, учитывающие априорную информацию о рельефе снимаемой территории.

Алгоритм совмещения РЛИЗ с учётом влияния рельефа

Когда имеются априорные знания о высоте рельефа в каждом пикселе основного РЛИЗ, совмещение изображений можно выполнить путём преобразования планарных координат каждого пикселя на основном РЛИЗ в геодезические и последующего их преобразования в планарные координаты на дополнительном РЛИЗ [2;3]. Преобразования выполняются с помощью прямой и обратной функций геодезической привязки РЛИЗ, значения которых получают итерационно с использованием численных методов. Поэтому для совмещения РЛИЗ в соответствии с данным подходом требуется большой объём вычислений.

В то же время из рис.1 видно, что полиномиальная модель [1] при фиксированной высоте рельефа обеспечивает вы-

сокую точность совмещения, а зависимость её погрешности от высоты носит квазилинейный характер и может быть с высокой точностью аппроксимирована полиномом малой степени. Следовательно, геометрическое соответствие двух РЛИЗ можно с высокой точностью определить с помощью алгоритма, основанного на двойной полиномиальной модели. В ней функции соответствия планарных координат объекта на двух РЛИЗ для нескольких фиксированных значений высоты аппроксимируются полиномами вида (1). Коэффициенты полиномов (1) определяются по небольшому набору пикселей основного РЛИЗ, для которых с помощью прямой и обратной функций геодезической привязки определены координаты соответствующих им пикселей на дополнительном РЛИЗ.

Значения полиномов (1), построенных для нескольких значений высоты, в некотором пикселе основного РЛИЗ используются для построения полиномов, аппроксимирующих влияние высоты в данном пикселе:

$$\Delta R_2(R_1, a_1) = \sum_{i=0}^M k_{Ri}(R_1, a_1)(h - h_0)^i,$$

$$\Delta a_2(R_1, a_1) = \sum_{i=0}^M k_{ai}(R_1, a_1)(h - h_0)^i,$$

где $k_{Ri}(R_1, a_1)$ и $k_{ai}(R_1, a_1)$ – коэффициенты полинома; M – степень полинома. В качестве h_0 выбирается значение высоты, для которого была построена одна из пар полиномов вида (1). Такая пара полиномов с коэффициентами $k_{Rij}^{\text{баз}}$ и $k_{aij}^{\text{баз}}$ объявляется базовой и используется в двойной полиномиальной модели геометрического соответствия:

$$R_2 = \sum_{\substack{i \geq 0, j \geq 0, \\ i+j \leq N}} k_{Rij}^{\text{баз}} R_1^i a_1^j + \sum_{i=0}^M k_{Ri}(R_1, a_1)(h - h_0)^i,$$

$$a_2 = \sum_{\substack{i \geq 0, j \geq 0, \\ i+j \leq N}} k_{aij}^{\text{баз}} R_1^i a_1^j + \sum_{i=0}^M k_{ai}(R_1, a_1)(h - h_0)^i.$$

Поскольку навигационная информация, сопровождающая РЛИЗ, как правило, не обеспечивает субпиксельную точность геодезической привязки, коэффициенты k_{Rij}^{baz} и k_{aij}^{baz} необходимо дополнительно уточнить путём корреляционно-экстремального отождествления. Коэффициенты $k_{Ri}(R_1, a_1)$ и $k_{ai}(R_1, a_1)$ при этом уточнять не требуется, поскольку влияние погрешностей геодезической привязки на них пренебрежимо мало.

При $M = 2$ и $N = 2$ погрешность полиномиальной аппроксимации пренебрежимо мала, а за счёт того, что вычислить значения полиномов гораздо проще, чем значения функций геодезической привязки, значительно сокращается объём вычислений [4].

Уточнение перпендикулярной интерферометрической базы

Для вычитания фазы плоского рельефа требуется с высокой точностью знать величину перпендикулярной интерферометрической базы. В противном случае на интерферограмме остаётся квазилинейный набег фазы вдоль строки.

К современным ЦМР предъявляется требование, чтобы среднеквадратичная ошибка высоты не превышала 2 м. Для этого высота из-за паразитного набега вдоль всей строки должна изменяться не более чем на 7 м. Типичные значения коэффициента пропорциональности фазы высоте рельефа составляют порядка $10^\circ/\text{м}$. Следовательно, набег фазы за строку должен быть не более 70° . Соответственно погрешность перпендикулярной интерферометрической базы не должна превышать нескольких дециметров. Навигационные системы ГЛОНАСС/GPS без дифференциальной коррекции не способны обеспечить такую точность. Поэтому уточнение базы необходимо осуществлять путём выявления и оценивания величины неустранённого набега фазы на интерферограмме.

Оценивание величины неустранённого набега фазы целесообразно выпол-

нять после вычитания фазы опорного рельефа. В этом случае сигнал на интерферограмме будет определяться неустранённым набегом, фазовыми шумами и мелкими деталями рельефа, о которых не имеется априорной информации. В зарубежной литературе предлагается оценивать величину набега путём выявления максимума амплитудного спектра сигнала интерферограммы [5]. Однако точность такой оценки явно недостаточна, поскольку ограничена 180° , набегающими вдоль всей строки.

Более точно оценить величину набега можно после развёртывания фазы путём аппроксимации плоскостью полученной фазовой поверхности. Однако при развёртывании крайне желательно, чтобы получаемая фазовая поверхность была как можно ближе к горизонтальной плоскости – иначе повышается вероятность возникновения ошибок развёртывания. Поэтому оценивание неустранённого набега целесообразно выполнять в два этапа: предварительно по максимуму амплитудного спектра перед развёртыванием фазы и окончательно – после развёртывания.

Влияние рельефа на оценку когерентности

При оценивании когерентности γ_{ij} в пикселе ij предполагается, что в случае отсутствия шумов в его окрестности амплитуды сигналов на двух РЛИЗ должны совпадать, а фаза на интерферограмме должна быть постоянной:

$$\gamma_{ij} = \frac{\left| \sum_{\Delta i} \sum_{\Delta j} |s_{1,i+\Delta i, j+\Delta j}| |s_{2,i+\Delta i, j+\Delta j}| e^{j\varphi_{1+\Delta i, j+\Delta j}} \right|}{\sqrt{\sum_{\Delta i} \sum_{\Delta j} |s_{1,i+\Delta i, j+\Delta j}|^2} \sqrt{\sum_{\Delta i} \sum_{\Delta j} |s_{2,i+\Delta i, j+\Delta j}|^2}},$$

где $|s_{1ij}|$ и $|s_{2ij}|$ – амплитуды комплексных сигналов на двух РЛИЗ, представленных в единой геометрии; φ_{ij} – фаза на интерферограмме, изменения которой от пикселя к пикселю могут быть обусловлены шумами и изменением высоты рельефа.

Проанализируем, как снижается оценка когерентности, если не учитывается наклон рельефа. Для этого рассмотрим случай, когда в окрестности пикселя амплитуда сигнала постоянна, фазовые шумы и отличия амплитуд сигналов на двух РЛИЗ отсутствуют, а вдоль строки интерферограммы наблюдается наклон рельефа, приводящий к изменению фазы на $\Delta\varphi$ за один пиксель. График, иллюстрирующий снижение оценки когерентности с увеличением $\Delta\varphi$ при различных радиусах

окрестности, в которой оценивается γ_{ij} , представлен на рис. 2. Видно, что при радиусе окрестности 4 пикселя заметное снижение оценки когерентности наблюдается уже при наклоне рельефа порядка 1 м/пиксель. При пространственном разрешении 3 м это соответствует углу отклонения от горизонтали порядка 20° . Таким образом, в случае холмистой местности уже желательно учитывать наклон рельефа.

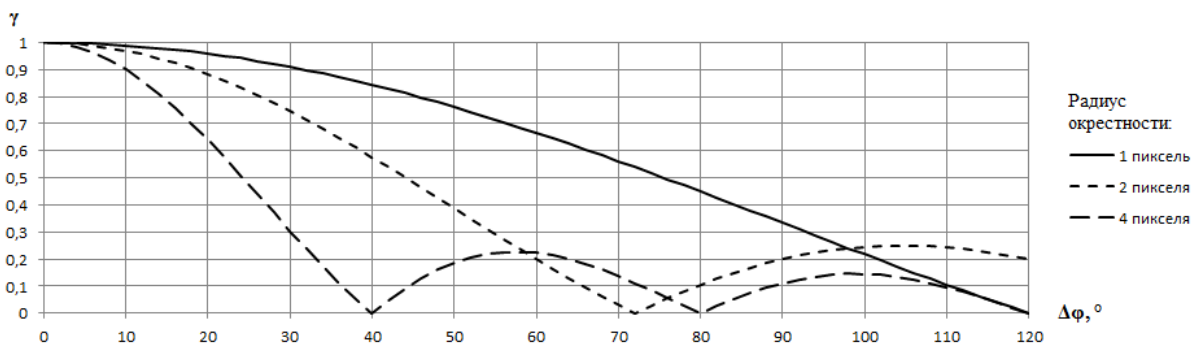


Рис. 2. Снижение оценки когерентности из-за наклона рельефа

При угле отклонения от горизонтали более 45° области на интерферограмме с низким уровнем шума ошибочно приписывается низкая когерентность, что приводит к игнорированию полезного сигнала в данной области. Во избежание этого при оценивании когерентности в случае горной местности необходимо учитывать наклон рельефа.

Учёт наклона рельефа осуществляется путём предварительного вычитания из интерферограммы фазы, соответствующей высоте опорного рельефа.

Развёртывание фазы

На данном этапе вариации фазы на интерферограмме обусловлены отличиями реального рельефа от опорного (подразумевается, что фаза опорного рельефа была вычтена) и шумами, не полностью подавленными при фильтрации. Следовательно, разворачиваемая фазовая поверхность должна быть близка к горизонтальной плоскости и отклоняться от неё лишь в локальных областях.

В основе развёртывания фазы лежит априорная информация о том, что высота рельефа медленно изменяется вдоль земной поверхности за исключением редких случаев обрывов, каньонов и крутых горных склонов. Следовательно можно предположить, что фаза на интерферограмме за один пиксель изменяется не более чем на половину периода, то есть 180° или π . Данное условие может не выполняться в небольшой доле пикселей либо из-за шума, либо из-за крутого наклона рельефа. Поэтому при развёртывании необходимо выявить такие пиксели и восстановить истинный градиент фазы в них.

Обозначим свёрнутые значения фазы, принадлежащие полуинтервалу $(-\pi, \pi]$, как $\tilde{\varphi}_{ij}$. Истинные значения фазы φ_{ij} отличаются от $\tilde{\varphi}_{ij}$ на целое количество периодов, в общем случае различное для каждого пикселя. На основе $\tilde{\varphi}_{ij}$ можно вычислить свёрнутые горизонтальные и вертикальные градиенты фазы, также принадлежащие полуинтервалу $(-\pi, \pi]$:

$$\begin{aligned}\tilde{G}_{ijx} &= (\tilde{\varphi}_{i,j+1} - \tilde{\varphi}_{ij}) \bmod (2\pi), \\ \tilde{G}_{ijy} &= (\tilde{\varphi}_{i+1,j} - \tilde{\varphi}_{ij}) \bmod (2\pi).\end{aligned}$$

Истинные горизонтальные и вертикальные градиенты фазы в общем случае отличаются от свёрнутых на целое количество периодов:

$$\begin{aligned}G_{ijx} &= \tilde{G}_{ijx} + 2\pi k_{ijx}, \\ G_{ijy} &= \tilde{G}_{ijy} + 2\pi k_{ijy}.\end{aligned}\quad (2)$$

При этом в большинстве пикселей $G_{ijx} = \tilde{G}_{ijx}$ и $G_{ijy} = \tilde{G}_{ijy}$.

В общем случае однозначно выявить пиксели, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$, невозможно. Известно лишь, что они лежат на некоторых линиях, попарно соединяющих точки, в которых нарушается свойство потенциальности свёрнутого градиента фазы, то есть $\xi_{ij} \neq 0$, где:

$$\xi_{ij} = \tilde{G}_{ijx} + \tilde{G}_{i,j+1,y} - \tilde{G}_{i+1,jx} - \tilde{G}_{ijy}.$$

Такие точки называются сингулярными и им приписывается заряд в соответствии со знаком ξ_{ij} . При этом точки в паре, которые соединяются линией, должны иметь противоположные заряды. Кроме того, линии, проходящие через интерферограмму, могут соединять сингулярные точки, лежащие за её пределами. В этом случае один или оба конца линии будут лежать на границе интерферограммы.

Конкретное положение линий определяется сюжетом, однако, как правило, их суммарная длина близка к минимально возможной. Поэтому существующие методы сводят развёртывание фазы к той или иной задаче оптимизации. Однако на определённых сюжетах решение конкретной задачи оптимизации может значительно отличаться от истинной фазовой поверхности. При этом для каждого метода развёртывания фазы имеется априорная информация: на каких типах сюжетов он обеспечивает приемлемую точность, а на

каких приводит к значительным ошибкам. Рассмотрим эту информацию.

Метод отсечения ветвей [6] основан на «жадном» алгоритме, находящем квазиоптимальное решение задачи минимизации суммарной длины линий отсечения. Значения \tilde{G}_{ijx} и \tilde{G}_{ijy} вдоль проведённых линий игнорируются при восстановлении фазовой поверхности. Метод не требует большого объёма вычислений и правильно проводит линии между парами сингулярных точек, вызванных редкими шумами в областях высокой и средней когерентности.

В методе потока минимальной стоимости [7] осуществляется переход от интерферограммы к транспортной сети, а линиям, соединяющим сингулярные точки, ставятся в соответствие пути проведения потоков в сети. При этом минимизируется суммарная стоимость всех потоков, в которой может учитываться не только расстояние между соединяемыми точками, но и когерентность, наклон фазовой поверхности и другие данные, получаемые при анализе интерферограммы. Проведение потоков позволяет также восстановить истинный градиент фазы по формуле (2), вычислив k_{ijx} и k_{ijy} в соответствии с проведённым количеством единиц потока. Метод обеспечивает высокую точность развёртывания фазы в областях высокой и средней когерентности в случае редких фазовых шумов и в простейших случаях крутого наклона рельефа. Недостатком метода является высокая вычислительная сложность, из-за которой его применяют не ко всей интерферограмме, а к её небольшим фрагментам. При этом значительно снижается точность и возникает проблема несогласованности результатов на границе соседних фрагментов.

Метод наименьших квадратов [8] не пытается напрямую определить положение линий, соединяющих сингулярные точки, а исходит из того, что пикселей, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$, на интерферограмме очень мало. Поэтому в

нём строится фазовая поверхность, горизонтальные и вертикальные градиенты которой максимально похожи на \tilde{G}_{ijx} и \tilde{G}_{ijy} по весовому критерию наименьших квадратов. Развёртывание фазы сводится к многократному решению уравнения Пуассона в рамках итерационной схемы Пикара или метода сопряжённых градиентов, для чего требуется большой объём вычислений. Но, тем не менее, порядок сложности при этом меньше, чем у метода потока минимальной стоимости. Метод позволяет проигнорировать сильно зашумлённый сигнал в областях низкой когерентности и приближённо восстановить в них фазовую поверхность по значениям фазы на границах этих областей. Наличие сингулярных точек в областях высокой и средней когерентности приводит к локальным ошибкам развёртывания, постепенно убывающим с расстоянием. В случае, когда сингулярных точек достаточно много, за счёт суммирования ошибок возникает паразитный наклон фазовой поверхности на значительной части интерферограммы. Однако, если задать нулевые веса всем пикселям, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$, метод наименьших квадратов обеспечит высокоточное развёртывание фазы в областях с ненулевым весом. При этом если несколько областей с ненулевым весом будут полностью изолированы друг от друга, средние уровни фазы в них будут подобраны так, чтобы наклон фазы на разделяющих их участках с нулевым весом был как можно меньше. Это не следует из весового критерия наименьших квадратов, однако обеспечивается итерационными схемами Пикара и метода сопряжённых градиентов, его минимизирующими.

Критерий выделения областей крутого наклона рельефа

Пиксели, в которых свёрнутый градиент фазы отличается от истинного из-за шумов, позволяет выделить «жадный» алгоритм, используемый в методе отсечения

ветвей [6], а для выделения пикселей, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$ из-за крутого наклона рельефа, необходимо разработать критерий.

Анализ интерферограмм показал, что отличия свёрнутого градиента фазы от истинного из-за крутого наклона рельефа наиболее часто возникают в тех областях, в которых от пикселя к пикселю резко изменяются модуль или направление вектора свёрнутого градиента фазы $\tilde{\mathbf{G}}_{ij} = (\tilde{G}_{ijx}, \tilde{G}_{ijy})$.

Относительное сходство модуля и направления двух векторов градиента можно оценить с помощью функции:

$$s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} \frac{\mathbf{G}_1 \mathbf{G}_2}{2(\max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|))^2} + \frac{1}{2}, & G > 0; \\ 1, & G = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Применив пороговую обработку значений функции (3), можно выделить области на интерферограмме, в которых наиболее вероятно отличие свёрнутого градиента фазы от истинного из-за крутого наклона рельефа.

Алгоритм развёртывания фазы

На основе приведённой информации о методах развёртывания фазы и предложенного выше критерия можно разработать алгоритм комбинирования указанных методов.

Поскольку в случае, когда области низкой когерентности изолируют друг от друга области средней и высокой когерентности, восстановить единую фазовую поверхность способен только метод наименьших квадратов, который должен завершать развёртывание фазы.

Для достижения высокой точности предварительно должны быть с помощью предложенного выше критерия выделены пиксели, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$ из-за крутого наклона рельефа.

Данным пикселям назначаются нулевые веса. Критерий позволяет практически полностью выделить области крутого наклона рельефа. Небольшое количество пикселей может остаться невыделенным, что в результате дальнейшего развёртывания по методу наименьших квадратов приведёт к локальным ошибкам. Чтобы избавиться от этих ошибок, можно дополнительно обнулить веса в пикселях, в которых градиент полученной фазовой поверхности наиболее сильно отличается от \tilde{G}_{ijx} и \tilde{G}_{ijy} , и выполнить ещё некоторое количество итераций по схеме Пикара или метода сопряжённых градиентов [8] с новыми весами.

Также перед развёртыванием фазы по методу наименьших квадратов следует выделить пиксели, в которых $G_{ijx} \neq \tilde{G}_{ijx}$ или $G_{ijy} \neq \tilde{G}_{ijy}$ из-за шумов, и восстановить истинный градиент фазы в них. Выделение пикселей осуществляется с помощью модификации «жадного» алгоритма из

метода отсечения ветвей. Модификация заключается в том, что минимизируется не суммарная длина линий отсечения, а суммарная стоимость потоков. При этом в первую очередь проводятся наиболее «дешёвые» потоки, а на максимальную стоимость проводимого потока накладывается ограничение. Это позволяет учитывать только сингулярные точки, вызванные шумами. Восстановление истинного градиента фазы осуществляется так же, как и в методе потока минимальной стоимости.

Предложенный алгоритм комбинирования методов развёртывания фазы позволяет добиться более высокой точности для тех сюжетов, на которых каждый метод в отдельности приводит к значительным ошибкам. Покажем это на примере развёртывания фазы интерферограммы заповедника Улуру (Австралия), полученной по паре РЛИЗ от космической системы TerraSAR-X (рис. 3).



Рис. 3. Интерферограмма заповедника Улуру до вычитания фазы опорного рельефа

Результаты развёртывания с помощью методов отсечения ветвей, потока минимальной стоимости, наименьших квадратов и предложенного алгоритма представлены соответственно на рис. 4, а,

б, в и г. Области на интерферограмме, в которых метод отсечения ветвей не развернул фазу, полностью их изолировав, показаны на рис. 4, а белым цветом. Из рис. 4 видно, что результат развёртывания

предложенным алгоритмом содержит гораздо меньше ошибок, чем результаты классических методов.

Пересчёт фазы в высоту

В случае полной изоляции отдельных фрагментов интерферограммы областями нулевого веса соотношение средних уровней фазы в них будет приближённо восстановлено методом наименьших квадратов при развёртывании фазы. Такой точности достаточно для окончательного уточнения интерферометрической базы. Однако средний уровень фазы отдельных изолированных фрагментов может быть восстановлен неправильно, что приводит к локальным ошибкам определения высо-

ты порядка нескольких десятков метров. Поэтому, если площадь изолированного фрагмента достаточно велика, то для того, чтобы имелась высокоточная опорная информация о его средней высоте, целесообразно откалибровать средний уровень фазы в нём по опорному рельефу.

Так в примере на рис. 4, *г* скала в центре изображения была полностью изолирована от окружающей местности, а уровень фазы на ней занижен приблизительно на период. Для скалы имеется порядка 3000 отсчётов опорной высоты, по которым можно с высокой точностью восстановить истинный уровень фазы на ней.

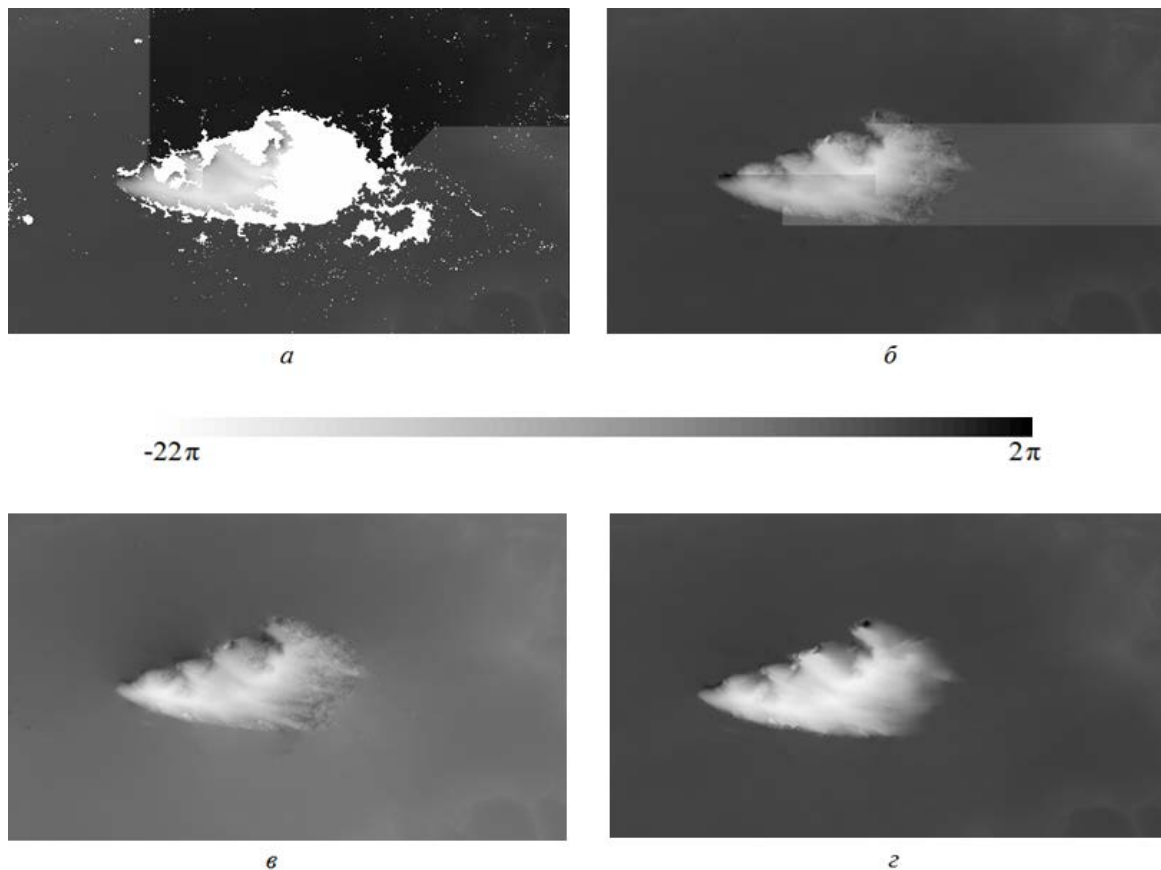


Рис. 4. Результаты развёртывания фазы после прибавления фазы опорного рельефа

Получение априорной информации о рельефе

В качестве источника априорных данных о рельефе могут выступать глобальные ЦМР низкого разрешения, имеющиеся в открытом доступе: SRTM3, AS-

TER GDEM, GMTED2010 и другие. Их пространственное разрешение варьируется от 30 до 900 м, а среднеквадратичная ошибка высоты – от 10 до 20 м. Часть ЦМР получена путём интерферометрической обработки РЛИЗ, часть – путём сте-

реофотограмметрической обработки оптических изображений. При этом предпочтение следует отдать наиболее детальным ЦМР, полученным по оптическим изображениям, поскольку в горных районах с крутым наклоном рельефа они содержат меньше артефактов, чем ЦМР, полученные по РЛИЗ, а именно в этих районах для интерферометрической обработки особенно нужны высокоточные опорные данные.

Заключение

Проведён анализ влияния рельефа на точность получения ЦМР при интерферометрической обработке. Показано, что в горной и холмистой местности необходим максимальный учёт априорной информации о рельефе, иначе ошибки совмещения РЛИЗ и оценивания когерентности могут привести к полной потере информации о высоте. Разработан алгоритм быстрого и

высокоточного совмещения РЛИЗ с учётом опорного рельефа.

Рассмотрен учёт опорного рельефа на всех ключевых этапах интерферометрической обработки. В качестве априорной информации о рельефе предложено использовать глобальные ЦМР низкого разрешения и указано, каким из них следует отдавать предпочтение.

Выполнен анализ существующих методов развёртывания фазы и выявлены типы сигнала на интерферограмме, для которых тот или иной метод обеспечивает высокую точность. По результатам анализа разработан алгоритм комбинирования указанных методов, позволяющий повысить точность развёртывания фазы и дальнейшего определения высоты.

Произведена апробация предложенных алгоритмов с использованием РЛИЗ от современных зарубежных космических PCA TerraSAR-X, RadarSat-2, COSMO-SkyMed.

Библиографический список

1. Li Z., Bethel J. Image coregistration in SAR interferometry // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. V. XXXVII. Part B1. P. 433-438.
2. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR image registration // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44, Iss. 10. P. 2861-2870. DOI: 10.1109/tgrs.2006.875787
3. Arikan M., Van Leijen F., Guang L., Hanssen R. Improved image alignment under the influence of elevation // *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*. 2008. Iss. 649. 5 p.
4. 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. № 1(51). С. 72-79.
5. Ren K., Prinert V., Shi X., Wang F. Comparison of satellite baseline estimation methods for interferometry applications // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2003. V. 6. P. 3821-3823. DOI: 10.1109/igarss.2003.1295281
6. Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // *Radio Science*. 1988. V. 23, Iss. 4. P. 713-720. DOI: 10.1029/rs023i004p00713
7. Constantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998. V. 36, Iss. 3. P. 813-821. DOI: 10.1109/36.673674

8. Ghiglia D.C., Romero L.A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods // Journal of the Optical Society of America A. 1994. V. 11, Iss. 1. P. 107-117. DOI: 10.1364/josaa.11.000107

Информация об авторах

Ушенкин Виктор Андреевич, аспирант кафедры вычислительной и прикладной математики, Рязанский государственный радиотехнический университет. E-mail: foton@rsreu.ru. Область научных интересов: цифровая обработка изображений.

Егошкин Николай Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института «Фотон», Рязанский государственный радиотехнический университет. E-mail: foton@rsreu.ru. Область научных интересов: цифровая обработка изображений.

USING APRIORI INFORMATION IN INTERFEROMETRIC PROCESSING OF HIGH RESOLUTION SAR DATA

© 2016 V. A. Ushenkin, N. A. Egoshkin

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation

The paper presents an analysis of approaches to using apriori information on relief to improve the quality of spaceborne SAR data interferometric processing. The impact of relief on geometric matching of SAR images is analyzed and an algorithm of fast and high-precision SAR image matching based on polynomial approximation of relief height impact is proposed. The necessity of perpendicular baseline refinement, given the current accuracy of navigation data, is shown. The need of using reference relief to refine the baseline is also shown. The expediency of baseline refinement before and after phase unwrapping is substantiated. The impact of the steepness of relief slope on the coherence estimation is calculated. The existing methods of phase unwrapping are analyzed and an algorithm of their combining is proposed, based on apriori information on each method. A criterion for selecting areas on the interferogram where the true phase varies greatly from pixel to pixel because of the steep relief slope is presented. Phase – to – height conversion is also considered. Using publicly available global low resolution DEMs as apriori information on the relief is proposed.

Interferometric processing, SAR image, interferogram, DEM, coherence, interferometric baseline, phase unwrapping.

References

1. Li Z., Bethel J. Image coregistration in SAR interferometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. V. XXXVII, part B1. P. 433-438.
2. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44, Iss. 10. P. 2861-2870. DOI: 10.1109/tgrs.2006.875787
3. Arikan M., Van Leijen F., Guang L., Hanssen R. Improved image alignment under the influence of elevation. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*. 2008. Iss. 649. 5 p.
4. Egoshkin N.A., Ushenkin V.A. DEM-assisted high resolution image coregistration for InSAR processing. *Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*. 2015. No. 1(51). P. 72-79. (In Russ.)

Citation: Ushenkin V.A., Egoshkin N.A. Using apriori information in interferometric processing of high resolution sar data. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 200-207. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-208-219

5. Ren K., Prinnet V., Shi X., Wang F. Comparison of satellite baseline estimation methods for interferometry applications. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2003. V. 6. P. 3821-3823. DOI: 10.1109/igarss.2003.1295281

6. Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. 1988. V. 23, Iss. 4. P. 713-720. DOI: 10.1029/rs023i004p00713

7. Constantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998. V. 36, Iss. 3. P. 813-821. DOI: 10.1109/36.673674

8. Ghiglia D.C., Romero L.A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *Journal of the Optical Society of America A*. 1994. V. 11, Iss. 1. P. 107-117. DOI: 10.1364/josaa.11.000107

About the authors

Ushenkin Victor Andreevich, postgraduate student, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation. E-mail: foton@rsreu.ru. Area of Research: digital image processing.

Egoshkin Nikolay Anatolievich, Candidate of Science (Engineering), leading researcher, Scientific Research Institute «Foton», Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation. E-mail: foton@rsreu.ru. Area of Research: digital image processing.