

А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Исследование алгоритмов развертывания фазы при формировании цифровых моделей местности методом космической радиолокационной интерферометрии

Рассмотрены некоторые вопросы обработки данных, получаемых при радиолокационной интерферометрической съемке космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой высокого и сверхвысокого разрешения. Проведено экспериментальное исследование точностей цифровых моделей рельефа при использовании различных алгоритмов развертывания интерферометрической фазы. Определены наилучшие с точки зрения точности и скорости обработки алгоритмы.

Системы радиолокационной интерферометрической съемки, цифровые модели рельефа, развертывание фазы

Описание рельефа как системообразующего фактора местности в виде цифровой модели является основой создаваемой Российской инфраструктуры пространственных данных (РИПД). Под неровностями земной поверхности (рельефом) понимают отклонение поверхности геоида Земли в данной точке (абсолютные высоты) относительно поверхности аппроксимирующего эллипсоида. В России в качестве начала системы нормальных высот над референц-эллипсоидом Красовского (система координат 1942 года, СК-42) устанавливается положение Кронштадского футштока (Балтийская система высот, БСВ). Одним из методов получения данных о рельефе местности является радиолокационная съемка, осуществляемая космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА). В радиолокационном диапазоне данные для цифровых моделей рельефа (ЦМР) получают в результате стереометрической или интерферометрической обработки получаемых сигналов. Широко известны полученные системой такого типа общедоступные данные цифровой карты высот поверхности земли SRTM-3 с периодом пространственной дискретизации 90 м.

Применение интерферометрической обработки данных для получения информации о рельефе местности и его изменениях, наряду с реализацией режимов сверхвысокого (1-3 м) пространственного разрешения стало основной тенденцией развития современных радиолокационных систем космического наблюдения. Такая обработка данных космических РСА включает следующие этапы синтеза пары комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) одной и той же области поверхности, пространственное их совмещение с формированием интерферограммы; фильтрации фазового шума на полученной интерферограмме; развертывание фазы интерферограммы и ее полное геокодирование (пересчет значений развернутой фазы в значения высот

рельефа и переход от полетной системы координат к какой-либо картографической проекции). Из указанных этапов наибольшие проблемы возникают при разворачивании интерферометрической фазы.

Развертывание фазы (phase unwrapping) применительно к системам радиолокационной интерферометрической съемки – это процесс преобразования картины двумерной относительной фазы, принимающей значения только в интервале $[-\pi, \pi]$, в картину абсолютной фазы, диапазон принимаемых значений для которой не ограничен. Закон же изменения абсолютной фазы тесно связан с формой рельефа соответствующей земной поверхности (при малых размахах рельефа эти законы почти пропорциональны друг другу). Стоит отметить, что при небольших перепадах рельефа и коротких интерферометрических базах разворачивание фазы может и не потребоваться (вся интерферограмма умещается в рамках одной интерференционной полосы), но в большинстве случаев этот этап интерферометрической обработки радиолокационных данных необходим, и именно он является самым вычислительно емким и алгоритмически сложным.

Для осуществления операции разворачивания фазы разработано несколько десятков алгоритмов [2, 3, 5], большинство из которых связано с операцией интегрирования фазового градиента (одномерный случай представлен на рис. 1), однако данный подход справедлив, если выполняется условие гладкости фазы, которое в условиях данной задачи эквивалентно условию потенциальности поля градиента фазы (т.е. фактически – гладкости рельефа). Характерными местами нарушения гладкости рельефа (и появления разрывов фазы) являются высокие здания и сооружения на снимках сверхвысокого разрешения: из-за бокового обзора на изображении оно воспринимается «лежащим на боку», по стене здания обращенной в сторону РСА, происходит набег фазы; в точках же, лежащих на дальней (по отношению к РСА) стороне крыши здания, имеет место разрыв фазы, т.к. следующие за ними элементы разрешения будут находиться на грунте (или на других зданиях), и расстояние до них скачкообразно изменяется.

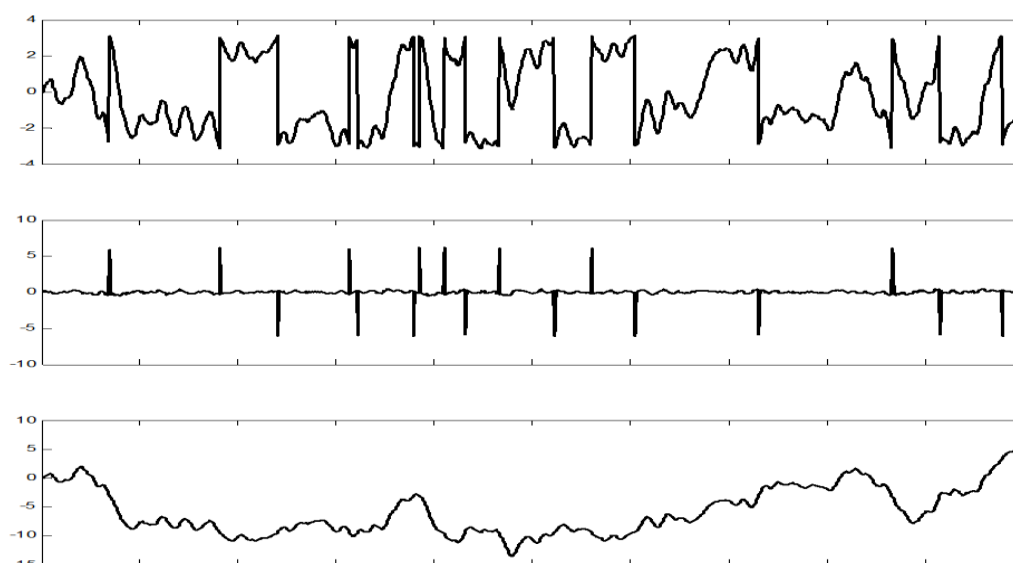


Рис. 1. Одномерное разворачивание фазы: относительная фаза (вверху), производная относительной фазы (в центре), абсолютная (развернутая) фаза (внизу)

Разработано несколько подходов к задаче развертывания фазы, основанных на аппарате из различных областей современной математики: от теории векторных полей (метод Гольдштейна, метод функций Грина) и теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод оптимизации сетевых потоков) до теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, нелинейная стохастическая фильтрация и др.) и генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п. Строгая классификация методов развертывания фазы на сегодняшний день отсутствует, есть довольно условное их разделение на глобальные и локальные (вычисляющие статистику в локальном окне малых размеров). Кроме того, применяются различные комбинации алгоритмов. Следует также отметить, что все реально используемые алгоритмы рассматривают задачу как двумерную: несмотря на то, что она легко сводится к последовательности одномерных задач с интегрированием вдоль любой из двух координат интерферограммы. Такой вариант не используется из-за неустойчивости к точечным выбросам фазовой помехи и естественным разрывам абсолютной фазы, возникающим при эффекте наложения.

Исторически первый алгоритм двумерного развертывания фазы – алгоритм Гольдштейна (Goldstein residue-cut algorithm) – основан на поиске точек и областей интерферограммы, где нарушается условие потенциальности градиента фазы, и исключении их из процесса интегрирования. Согласно этому условию, интеграл по любому замкнутому контуру в поле градиента фазы должен быть равен нулю:

$$\text{grad}\varphi_{i,j} + \text{grad}\varphi_{i+1,j} + \text{grad}\varphi_{i+1,j+1} + \text{grad}\varphi_{i,j+1} = 0. \quad (1)$$

Точки, в которых ротор градиента отличен от нуля, называют фазовыми вычетами или фазовыми остатками; они могут быть положительными и отрицательными. Пара из близлежащих отрицательного и положительного вычетов соединяется ветвью. Совокупность ветвей образует дерево. Далее различными методами оптимизации строится дерево наименьших размеров, после чего производится интегрирование изображения градиента фазы, причем пути интегрирования должны обрываться в местах пересечения с ветвями. Одной из проблем алгоритма Гольдштейна является его вычислительная неэффективность для интерферограмм большого размера, другая проблема заключается в том, что при минимизации размеров дерева возможно неправильное соединение вычетов в областях разрыва абсолютной фазы.

Другой подход к двумерному развертыванию фазы был разработан в 1994 году и получил название метода наименьших квадратов. Он заключается в минимизации суммы квадратов разностей градиента относительной фазы и оценки абсолютной фазы $\psi_{i,j}$, для чего решается система из $N \cdot M$ уравнений вида

$$\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} + \psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1} = \rho_{i,j}. \quad (2)$$

где: $\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) - (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i-1,j}^y)$, $\Delta_{i,j}^x = W \mathcal{F}_{i,j} - \varphi_{i-1,j}$, $\Delta_{i,j}^y = W \mathcal{F}_{i,j} - \varphi_{i,j-1}$, $W \mathcal{F}$ – оператор свертывания фазы в интервал $[\pi, \pi]$. Это уравнение представляет собой дискретную версию уравнения Пуассона. В чистом виде алгоритм применяется редко из-за большой размерности реально встречающихся задач, для ускорения вычислений используется быстрое преобразование Фурье, применяемое к массиву $\rho_{i,j}$. Существуют

модификации алгоритма, заключающиеся в добавлении в приведенные выше уравнения весовых коэффициентов, характерных для встречающихся на изображении нарушений.

Третий подход основан на рассмотрении задачи развертывания фазы как оптимизационной. Один из первых методов, использующий данный подход, – метод целочисленной оптимизации (метод Константини [4]). Использование аппарата целочисленного программирования связано с тем, что значения абсолютной и относительной фаз в любой точке интерферограммы отличаются на целое число фазовых 2π -оборотов. Метод основан на минимизации целевой функции:

$$\min_{k_1, k_2} \left\{ \sum_{i,j} c_1(i, j) \cdot |k_1(i, j)| + \sum_{i,j} c_2(i, j) \cdot |k_2(i, j)| \right\}. \quad (3)$$

что эквивалентно решению относительно $\psi_{i,j}$ системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left[\begin{array}{c} \psi_{i,j+1} - k'_{i,j} \\ \psi_{i+1,j} - k''_{i,j} \end{array} \right] = -\frac{1}{2\pi} \cdot \left[\begin{array}{c} \psi_{i+1,j+1} - \varphi_{i,j+1} \\ \psi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \psi_{i+1,j+1} - \varphi_{i+1,j} \\ \psi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} \end{array} \right]$$

$$\text{где: } k'_{i,j} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\begin{array}{c} \psi_{i+1,j} - \psi_{i,j} \\ \psi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} \end{array} \right], \quad k''_{i,j} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\begin{array}{c} \psi_{i,j+1} - \psi_{i,j} \\ \psi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} \end{array} \right]$$

Алгоритм относительно легко реализуется, однако, как и в случае с методом наименьших квадратов, скорость его работы низкая.

К алгоритмам, использующим оптимизационный подход, относится также алгоритм «минимальной стоимости потоков» (MCF).

Метод «растущих пикселей» – это один из локальных алгоритмов развертывания. Он основан на линейном предсказании значения абсолютной фазы элемента интерферограммы $\widehat{\psi}_{i,j}$ на основании развернутых ранее значений:

$$\widehat{\psi}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot \psi_{i-m,j-n}}{\sum w_{m,n}}. \quad (4)$$

где $\psi_{i-m,j-n}$ – набор значений абсолютных фаз (развернутых ранее), $w_{m,n}$ – весовые коэффициенты, M, N – полуразмеры локального окна. Наиболее используемыми на практике являются окна размером 5×5 элементов, для них $M = N = 2$. Весовые коэффициенты выбираются исходя из взаимного расположения развернутых и неразвернутых элементов интерферограммы по следующему правилу: на тех направлениях, где развертываемому элементу прилегают два развернутых элемента $\psi_{i-m,j-n}$, ближайший из них берется с коэффициентом 2, следующий – с коэффициентом 1, если же на выделенном направлении лежит только один ранее развернутый элемент, то он берется с весом 1. Исходных точек для развертывания может быть несколько, выбираются они на участках с высокой когерентностью.

Далее для предсказанного значения $\widehat{\psi}_{i,j}$ вычисляется количество оборотов фазы m , на которое требуется увеличить значение относительной фазы $\varphi_{i,j}$, чтобы ее значение стало наиболее близким к $\widehat{\psi}_{i,j}$:

$$m = \left[\frac{\psi_{i,j} - \varphi_{i,j}}{2\pi} \right], \text{ если } \left\{ \frac{\psi_{i,j} - \varphi_{i,j}}{2\pi} \right\} < 0.5 \text{ и}$$

$$m = \left[\frac{\psi_{i,j} - \varphi_{i,j}}{2\pi} \right] + 1, \text{ если } \left\{ \frac{\psi_{i,j} - \varphi_{i,j}}{2\pi} \right\} \geq 0.5$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ и $\{ \cdot \}$ – операторы взятия целой и дробной части числа соответственно. Далее производится «тест надежности», один из вариантов которого выглядит следующим образом:

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot |\psi_{i-m,j-n} - \hat{\psi}_{i,j}|}{\sum w_{m,n}} < 0.7. \quad (5)$$

Если тест выполняется, то значение абсолютной фазы считается принятым, если же нет, то элемент остается неразвернутым, а алгоритм переходит к развертыванию соседних элементов. По окончании работы алгоритма значения фаз элементов, не прошедших пороговый тест, могут быть определены путем интерполяции. Ввиду общей простоты используемых соотношений этот алгоритм развертывания фазы является одним из наиболее быстрых. Кроме того, введение дополнительных тестов и работа в режиме итераций с постоянно уменьшающимся порогом обеспечивает высокую точность. Данный алгоритм является базовым в пакете обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли SARscape.

Облегчить задачу развертывания фазы может компенсация фазового набега. Из-за геометрии бокового обзора топографическая фаза даже на плоской поверхности будет совершать набег на 2π каждые $\lambda H / (B_{\perp} \cos^2 \theta)$ метров (где H - высота фазового центра антенны радиолокатора над поверхностью Земли, B_{\perp} - перпендикулярная к направлению визирования составляющая интерферометрической базы, θ – угол визирования). Поскольку эта составляющая фазы является детерминированной, ее можно вычислить на основе известных параметров и вычесть из относительной фазы $\varphi(i, j)$. Такая операция приводит, как правило, к резкому сокращению числа интерференционных полос и изменению характера их расположения: после компенсации они располагаются не параллельно друг другу (и примерно перпендикулярно направлению съемки), а концентрически – вокруг возвышений и опусканий рельефа, и появляются они теперь при изменении высоты рельефа на $\lambda H \cdot \operatorname{tg} \theta / (B_{\perp} \cos^2 \theta)$.

Критериями оценки качества построения ЦМР являются:

- точности абсолютного положения контрольных точек в плане и по высоте (среднее абсолютное отклонение – с.а.о);
- максимальные погрешности контрольных точек в плане и по высоте;
- среднеквадратические погрешности представления высот контрольных точек (с.к.о.).

Одним из способов оценки точности созданной ЦМР является определение погрешностей между сечениями в произвольном направлении полученного и эталонного рельефа. Ввиду большой вычислительной емкости задачи развертывания фазы эффективность алгоритмов следует оценивать не только по точности развертывания, но и по скорости обработки.

Единичная ошибка развертывания порождает ложный перепад высот на результирующей цифровой модели рельефа, величина которого определяется параметром высоты неоднозначности – h_A , равной расстоянию (в вертикальном направлении), вдоль которого разностная фаза изменяется на величину 2π (рисунок 2). откуда высота неоднозначности получается равной:

$$h_A = \frac{\lambda r_0}{2B_{\perp} \sin \theta_1} = \frac{\lambda H}{B_{\perp} \sin 2\theta_1}. \quad (6)$$

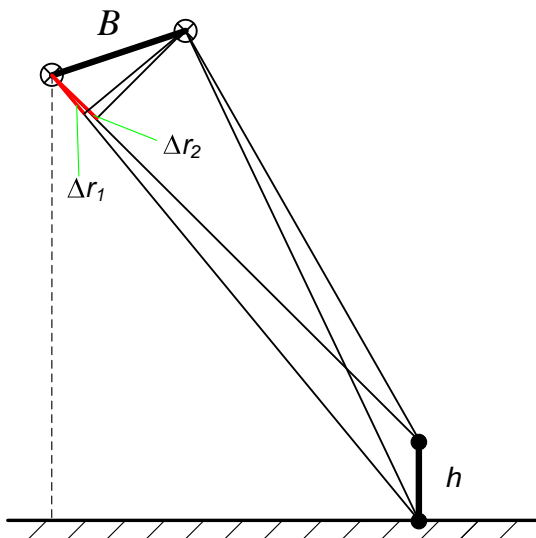


Рис. 2 – К определению высоты неоднозначности h_A

При обработке данных интерферометрической съемки, как правило, используется компенсация фазового набега от опорной плоскости, при которой из значения элемента интерферограммы $\Delta\varphi_i$ вычитается значение набега фазы от опорной точки цели, который априорно известен. В этом случае высота неоднозначности изменяется в $\sin^2 \theta_1$ раз и становится равной:

$$h'_A = \frac{\lambda r_0 \sin \theta_1}{2B_{\perp}} = \frac{\lambda H \cdot \sin^2 \theta_1}{2B_{\perp}}. \quad (7)$$

Значения высот неоднозначности h'_A для некоторых широко используемых космических съемочных систем при различных длинах интерферометрической базы (по отношению к критической длине $B_{\perp kp}$) приведены в таблице 2, откуда видно, что с увеличением длины базы эта высота уменьшается, соответственно, уменьшается и влияние единичной ошибки развертывания на точность результирующей цифровой модели рельефа.

Таблица 2 – Параметры интерферограмм, получаемых съемочными системами

| Космический аппарат | Режим съемки | $B_{\perp kp}$, км | h'_A , м | | |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | $0.1B_{\perp kp}$ | $0.5B_{\perp kp}$ | $0.9B_{\perp kp}$ |
| ALOS | Hi-resolution, 2 поляризации | 9,7 | 72 | 14 | 8,0 |
| | Hi-resolution, 1 поляризация | 19,5 | 36 | 7,1 | 4,0 |

| | | | | | |
|------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| ERS-2 | - | 1,3 | 129 | 30 | 17 |
| RADARSAT-1 | Fine | 4,2 | 46 | 9,1 | 5,1 |
| | Standard | 1,4 | 138 | 28 | 15 |
| TerraSAR-X | StripMap, 2 поляризации | 1,8 | 37 | 7 | 4 |
| | StripMap, 1 поляризация | 3,6 | 19 | 3,8 | 2,1 |

Экспериментальное исследование алгоритмов интерферометрической обработки проводилось на основе съемки тестового участка, содержащего как естественные изменения рельефа, так и антропогенные его нарушения (карьеры, отвалы), а также участки растительности разного типа (хвойные и лиственные леса, болота, сельскохозяйственные угодья), объекты с различной отражательной способностью радиоволн (водная поверхность, опоры ЛЭП, железные и автомобильные дороги, городская застройка).

Эталонная ЦМР тестового участка получена по данным планово-высотной основы цифровой топографической карты. На основании значений отметок высот методом интерполяции (триангуляции Делоне и сглаживания) построена эталонная цифровая модель рельефа с шагом дискретизации 10 м и вертикальной точностью 1,7 м. Кроме этого с использованием пары геодезических GPS-приемников Leica были получены координаты и высоты 10 контрольных точек – целей, хорошо распознаваемых на радиолокационном изображении.

Два радиолокационных изображения в комплексном формате, полученные радиолокатором PALSAR космического аппарата ALOS (время съемки – зима 2009 года), были предоставлены ООО «Совзонд» в рамках совместной работы с ФГУП «Уралгеоинформ». Пространственное разрешение снимков по наземной дальности составляло около 10 м, период дискретизации по наклонной дальности – 6.5 м, по азимуту – 3.5 м. В процессе интерферометрической обработки применялось некогерентное накопление с коэффициентами 2 по дальности и 4 по азимуту.

Интерферометрическая обработка проводилась в специализированном программном комплексе SARscape с использованием трех алгоритмов фильтрации: усредняющий с адаптивной подстройкой размера окна (boxcar), адаптивный пространственный (Adaptive window) и фильтр Гольдштейна, и двух алгоритмов развертывания фазы: алгоритм минимальных стоимостей потоков (MCF) и алгоритм «растущих пикселей» (Growing Region). Преобразование фазы в цифровую модель проводилось с использованием 7 опорных точек, далее путем сравнения с эталоном вычислялись с.к.о. и с.а.о. Результаты развертывания фазы различными алгоритмами проиллюстрированы на рис. 3. Ошибки развертывания фазы хорошо видны на рис. 3.б, где использовался алгоритм MCF.

Экспериментальная ЦМР в виде трехмерной картины приведена на рис. 4, а на рис. 5 приведено ее сравнение с эталонной по одному из сечений рельефа.

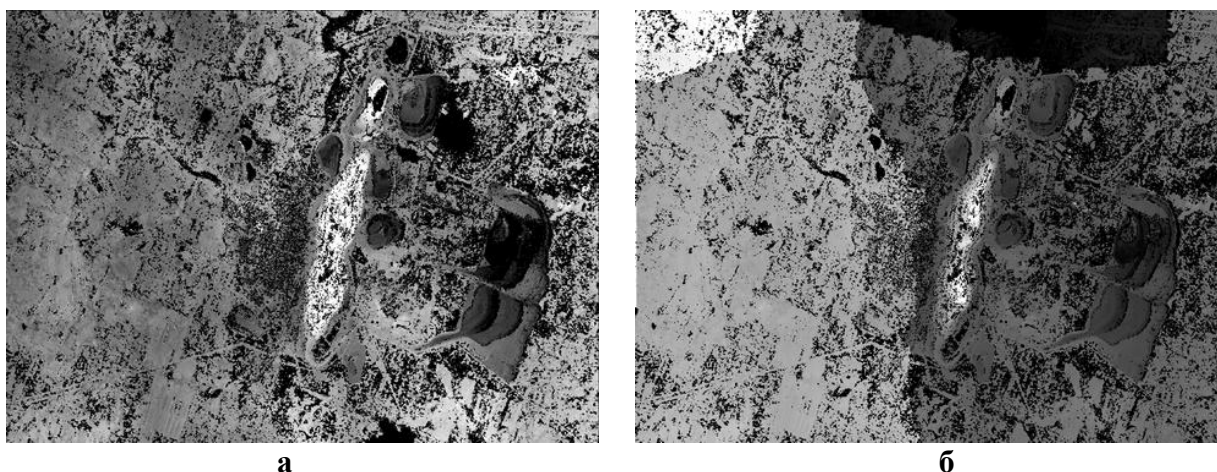


Рис. 3 – Результаты развертывания интерферограмм: алгоритм «растущих пикселей» (а) и алгоритм MCF (б).

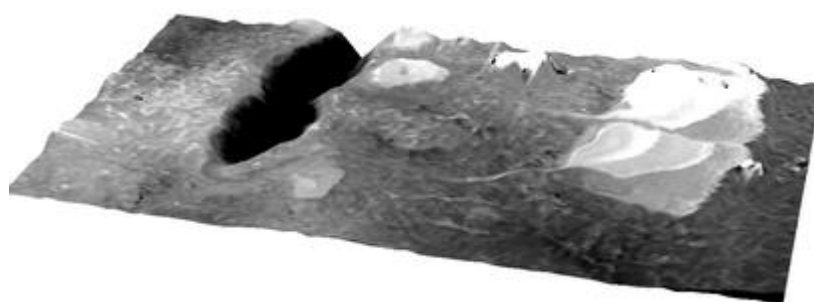


Рис. 4 – Цифровая модель рельефа, полученная в результате интерферометрической обработки



Рис. 5 – Сечения полученной модели и эталона (метод развертывания – «растущие пиксели»)

При анализе полученной ЦМР было отмечено, что на некоторых типах поверхностей отклонение от эталона заметно возрастает. В первую очередь это касается городских территорий: для радиолокационных данных используемого разрешения застроенные территории дают стабильное отражение, однако оно происходит не только от подстилающей поверхности, но и от всех частей зданий, за исключением попадающих в радиотень; а поскольку в один элемент разрешения попадет участок с несколькими зданиями, то топографическая фаза этого элемента будет соответствовать некоторой усредненной высоте (точнее – мат. ожиданию закона распределения высот элементарных отражателей [2]). Эталон же, в свою очередь, содержит только высоты подстилающей поверхности. По этой причине городские территории были исключены из подсчета статистик. Также были исключены и водные поверхности, так как на них наблюдается

полная декорреляция отраженных сигналов, и поле фазы на этих участках носит случайный характер.

Одним из путей повышения качества развёртывания интерферометрической фазы является применение некогерентного накопления сигнала (что эквивалентно суммированию по определённым правилам соседних элементов комплексного радиолокационного изображения), которое ведёт к снижению уровня фазового шума, улучшению читаемости интерференционных полос и, как следствие, более устойчивому развёртыванию. Ухудшение пространственного разрешения, возникающего при накоплении, можно скомпенсировать путём применения итеративной процедуры, при которой развёрнутая интерферограмма с высоким коэффициентом накопления (и низким пространственным разрешением) используется в качестве опоры для развёртывания интерферограммы с более низким коэффициентом накопления.

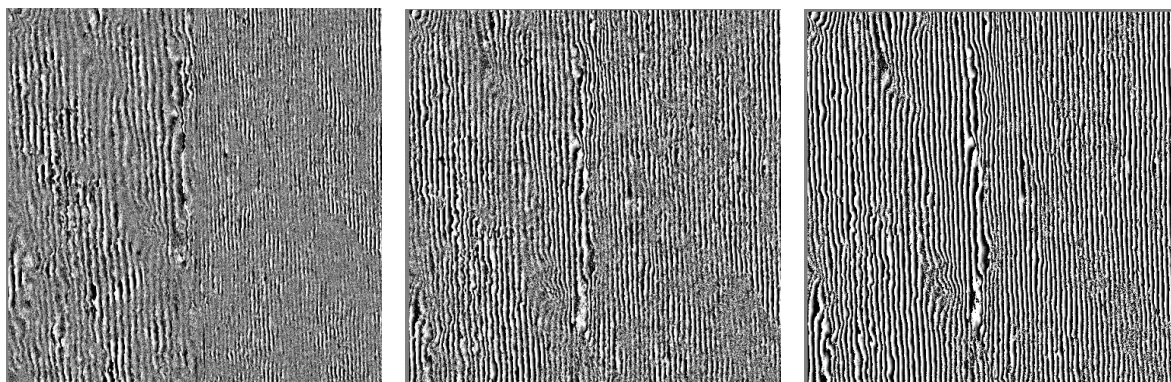


Рис. 6 – Улучшение «качества» интерферограммы (КА RADARSAT-1, режим Fine) при некогерентном накоплении: а – $K=2 \times 1$, б – $K=4 \times 4$, в – $K=8 \times 8$

Вертикальная точность цифровой модели рельефа, полученная в результате эксперимента, оказалась довольно высокой: при разрешении исходных изображений в 10 м она доходила до 6-7 м. Полученной точности цифровой модели рельефа вполне достаточно для создания рельефа цифровых топографических карт масштаба 1:100000 и с оговорками – 1:50000. Для других алгоритмов развёртывания значение точности модели рельефа ухудшается вплоть до 17 м. Помимо сравнения с картографическим эталоном, проводилось также и сравнение высот ЦМР с данными спутниковой геодезической съемки. Для модели рельефа, построенной с использованием алгоритма фильтрации фазового шума Goldstein и алгоритма развёртывания фазы Region Growing, было получено значение с.к.о. в 7.1 м, что практически совпадает с результатами сравнения по картографическому эталону. Для спутников сверхвысокого разрешения достижимы величины вертикальной точности в 2-3 м и лучше, однако на некоторых типах поверхностей (растительность любого типа) с.к.о. может быть неприемлемо большой.

Заключение

Предложена методика экспериментальной оценки алгоритмов фильтрации и развёртывания фазы при интерферометрической обработке данных космических РСА, включающая требования к тестовому участку, процедуру построения эталонной ЦМР, критерии оценки качества построенной модели. На основе экспериментальной обработки фрагментов РЛИ, полученных РСА ALOS PALSAR, показано что наилучшие результаты по точности и быстродействию дает комбинация из алгоритма фильтрации Гольдштейна и

алгоритма развертывания «растущие пиксели». Вертикальная точность цифровой модели рельефа, полученная в результате экспериментов, оказалась довольно высокой: при разрешении исходных изображений в 10 м она составила около 6-7 м. Полученной точности цифровой модели рельефа вполне достаточно для создания рельефа цифровых топографических карт масштаба 1:100 000.

Список литературы

1. И.В.Елизаветин И.В., Ксенофонтов Е.А. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического РСА// Исследования Земли из космоса, 1996,- № 1, с. 75-90.
2. Ramon F. Hanssen. Radar Interferometry. Kluwer Academic Publishers, 2002
3. Цифровая обработка сигналов в радиофизических приложениях. / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2007, 544 с.
4. M. Constantini, A phase unwrapping method based on network programming, Proc. FRINGE '96, 1996
5. В.Г. Коберниченко, А.В. Сосновский. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, т. 13, № 3, 2010

V. G. Kobernichenko, A. V. Sosnovsky

Yeltsin Ural Federal University

Phase unwrapping algorithms investigation in digital elevation maps generation using space-based InSAR systems

An analysis of digital elevation models building using high- and superhigh resolution InSAR systems is held. An experimental investigation of digital elevation maps accuracy with usage of different phase unwrapping algorithms is made. The best in accuracy and processing speed algorithms are defined.

InSAR systems, digital elevation maps, phase unwrapping

Известия вузов России. Радиоэлектроника. Специальный выпуск. 2012. С. 84-92.