

В.Г. КОБЕРНИЧЕНКО, А.В. СОСНОВСКИЙ
**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОСМИЧЕСКОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии.

Аннотация. Рассмотрены основные этапы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого и сверхвысокого разрешения при построении цифровых моделей рельефа. Приведены результаты экспериментального исследования точности цифровых моделей рельефа при использовании различных алгоритмов фильтрации фазового шума и методов развертывания интерферометрической фазы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой, интерферометрическая обработка, цифровая модель рельефа.

Kobernichenko V.G., Sosnovsky A.V. Particular qualities of digital elevation maps generation in Interferometric SAR technology.

Abstract. Basic stages of high and super-high resolution space borne synthetic aperture radar data interferometric processing are reviewed. The results of experimental research of the digital elevation maps generation with processing by different phase noise filtration algorithms and phase unwrapping methods are presented.

Keywords: remote sensing of the Earth, synthetic aperture radars, interferometric processing, digital elevation map.

1. Введение. Описание рельефа как системообразующего фактора местности в виде цифровой модели является основой создаваемой Российской инфраструктуры пространственных данных. Цифровое моделирование рельефа определяется как создание цифровой модели рельефа и ее использование и представляет собой совокупность методов моделирования и анализа земной поверхности и взаимосвязей между рельефом и другими естественными и антропогенными компонентами ландшафта. В свою очередь цифровая модель рельефа (ЦМР) — это цифровая картографическая модель, содержащая информацию о неровностях земной поверхности, под которыми понимают отклонение поверхности Земли в данной точке (абсолютная высота) относительно поверхности аппроксимирующего эллипсоида.

Появление в 1980-х гг. космических аппаратов, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой (Seasat, Алмаз-1, ERS-1, SIR-A/B и др.), дало старт развитию новой технологии получения цифровых моделей рельефа — радиолокационной интерферометрии (англ. — InSAR). В настоящее время построение ЦМР стало одной из

основных задач, решаемых на основе обработки данных современных радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Метод космической радиолокационной интерферометрии, суть которого заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами либо одной антенной на двух витках орбиты. Он сочетает высокую точность фазового метода измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [1, 2, 5].

Этапы интерферометрической обработки реализованы в специализированных программных комплексах обработки данных ДЗЗ дистанционного зондирования Земли, таких как SARscape, IMAGINE Radar Mapping, Photomod Radar, так что можно говорить об информационной технологии построения ЦМР. Вместе с тем, поскольку на каждом этапе используются многочисленные эмпирические алгоритмы и методы, важной остается задача выбора наиболее эффективных алгоритмов с точки зрения конечного результата. Открытыми остаются также вопросы получения экспериментальных оценок точности формируемых ЦМР. Обсуждению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

2. Технология космической радиолокационной интерферометрии. Исходными данными для интерферометрической обработки являются два комплексных радиолокационных изображения, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой с двух параллельных орбит, расположенных на малом расстоянии (для космической съемки — до нескольких километров) друг от друга. Фаза отраженного сигнала является случайной величиной, содержащей детерминированную составляющую, связанную с рельефом облучаемой поверхности («топографическая фаза»), и составляющие, связанные со случайными изменениями при отражении от поверхности и прохождении волны через атмосферу, с набегами в узлах приёмопередающей аппаратуры и остаточными искажениями при апертурном синтезе.

При интерферометрической обработке случайные составляющие фаз частично компенсируют друг друга, что позволяет в явном виде выделить топографическую составляющую, которая зависит от длины волны зондирующего радиосигнала и разностного расстояния от

фазовых центров антенн P_1 и P_2 до элемента поверхности $\Delta r = r_2 - r_1$ (рис. 1). Через θ_1 обозначен угол падения волны при первой съёмке.

Значение разности фаз $\Delta\psi$ для точки поверхности, находящейся на расстоянии r_1 от антенны, позволяет определить высоту рельефа h относительно опорной поверхности (например, референц-эллипсоида):

$$h = H - r_1 \times \left(\cos \alpha \cdot \sqrt{1 - \frac{B^2 - (\Delta\psi \cdot \lambda / 4\pi)^2 + 2r_1 (\Delta\psi \cdot \lambda / 4\pi)^2}{2Br_1}} - \right. \\ \left. - \sin \alpha \cdot \frac{B^2 - (\Delta\psi \cdot \lambda / 4\pi)^2 + 2r_1 (\Delta\psi \cdot \lambda / 4\pi)^2}{2Br_1} \right), \quad (1)$$

где H — высота орбиты, λ — длина волны, B — база интерферометра, α — угол уклона базы. При этом $\Delta\psi = 4\pi \cdot \Delta r / \lambda$.

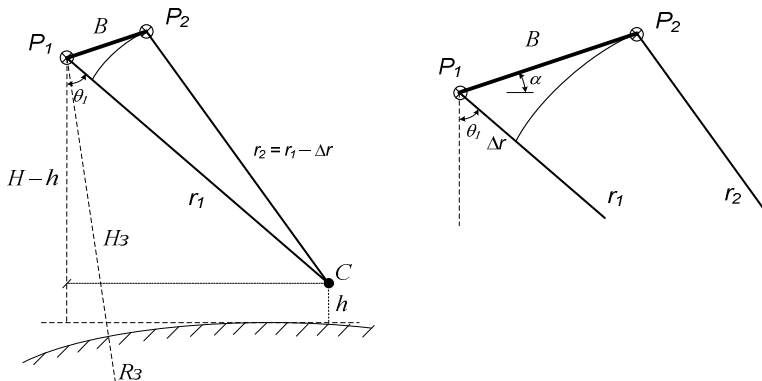


Рис. 1. Геометрия космической радиолокационной интерферометрической съёмки в вертикальной плоскости.

В результате взаимной привязки и комплексного перемножения двух полученных радиолокационных изображений формируется интерферограмма — картина разностной фазы $\Delta\psi_{ij}$ (рис. 2,а). Форма интерференционных полос, границы которых соответствуют набегам разностей фаз на величину 2π (что соответствует изменению разностного расстояния на величину $4\pi \cdot \Delta r / \lambda$), на интерферограмме зависит от геометрии съёмки и рельефа местности. Неполная

компенсация случайных составляющих фаз сигналов проявляется на интерферограмме в виде фазового шума, закон распределения которого при отсутствии фильтрации и некогерентного накопления отсчетов описывается выражением [1]:

$$p(\phi - \phi_0) \approx \frac{(1 - \gamma^2)}{2\pi} \cdot \frac{1}{1 - \gamma^2 \cdot \cos^2(\phi - \phi_0)} \times \left(\frac{\gamma \cdot \cos(\phi - \phi_0) \cdot \arccos[-\gamma \cdot \cos(\phi - \phi_0)]}{\sqrt{1 - \gamma^2 \cdot \cos^2(\phi - \phi_0)}} + 1 \right), \quad (2)$$

где ϕ_0 — математическое ожидание, соответствующее, как правило, разностной топографической фазе, γ — коэффициент когерентности, являющийся показателем качества участка интерферограммы, его пригодности для дальнейшего преобразования в цифровую модель рельефа [5]. Чем больше γ , тем, как правило, сильнее топографическая составляющая фазы преобладает над случайной.

Оценка коэффициента интерферометрической когерентности производится в локальных окнах по исходным радиолокационным изображениям и вычисляется как коэффициент корреляции между соответствующими комплексными отсчетами этих изображений по формуле:

$$\gamma = \frac{|\sum \dot{z}_1(i, j) \cdot \bar{z}_2(i, j)|}{\sqrt{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2}}, \quad (3)$$

где $\dot{z}_1(i, j)$ и $\dot{z}_2(i, j)$ — комплексные отсчеты первого и второго РЛИ соответственно, в пределах локального окна.

Однако данное соотношение предназначено для оценивания параметров случайных величин, и при применении его к двумерным случайным процессам возникают ошибки. Так, при появлении уклона (тренда) фазы оценка когерентности по формуле (3) начинает деградировать, и даже при полном отсутствии флуктуационной составляющей разностной фазы получить коэффициент когерентности равным или близким к единице становится невозможно. Величина деградации оценки зависит как от скорости изменения фазы, так и от размеров выборки, то есть от размеров окна оценки когерентности — чем больше окно, тем сильнее деградация.

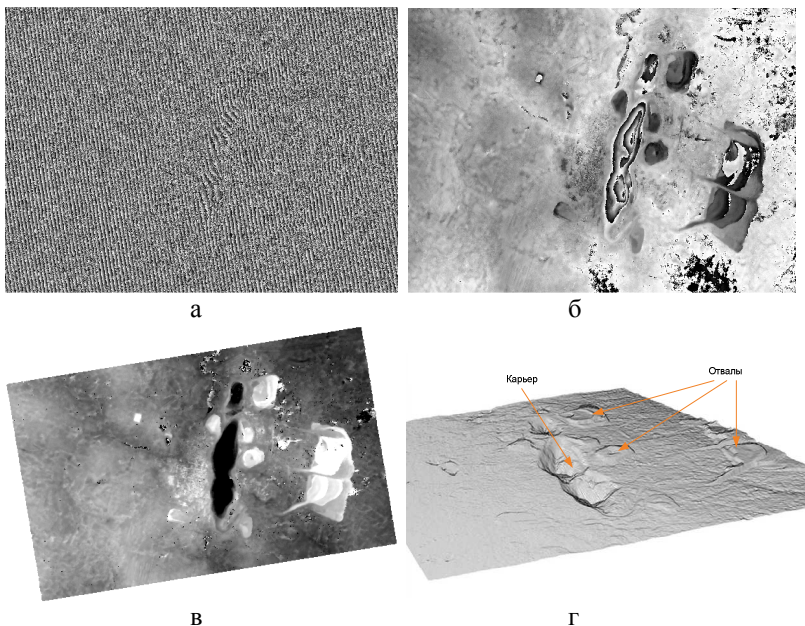


Рис. 2. Интерферограмма после различных этапов обработки: а — после комплексного перемножения РЛИ, б — после компенсации фазового набега от опорной поверхности и фильтрации, в — после геокодирования, г — цифровая модель рельефа

Для устранения зависимости оценки когерентности от линейного уклона фазы можно предложить оценку следующего вида:

$$\gamma = \frac{|\sum \dot{w}_1(i, j) \cdot \bar{w}_2(i, j)|}{\sqrt{\sum |\dot{w}_1(i, j)|^2 \cdot \sum |\dot{w}_2(i, j)|^2}}, \quad (4)$$

где $\dot{w}_{1,2}(i, j) = \dot{z}_{1,2}(i, j) \cdot \bar{z}_{1,2}(i-1, j-1)$. При таком подходе будет оцениваться когерентность не между элементами интерферограммы, а между новыми величинами \dot{w}_1 и \dot{w}_2 , сформированными из \dot{z}_1 и \dot{z}_2 таким образом, чтобы линейный тренд фазы уничтожился. Можно показать, что если действительные и мнимые части величин \dot{z}_1 и \dot{z}_2 распределены по нормальному закону (что для радиолокационных изображений, как правило, имеет место), то действительные и мнимые части величин \dot{w}_1 и \dot{w}_2 будут распределены по закону Лапласа (двустороннему экспоненциальному). Оценка γ будет иметь более

сильное смещение в области слабых корреляций (в сторону завышения), чем оценка γ , однако это смещение может быть уменьшено за счет увеличения размера выборки либо дополнительной модификации оценки.

Технологическая схема построения ЦМР при интерферометрической обработке радиолокационных данных включает следующие этапы (рис. 3): синтезирование пары комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) исследуемой местности, попиксельную взаимопривязку изображений, формирование интерферограммы путем поэлементного комплексного перемножения взаимопривязанных РЛИ; компенсацию фазового набега от опорной поверхности («выравнивание»); фильтрацию фазового шума; устранение фазовой неоднозначности — разворачивание фазы и плано-высотное геокодирование, т.е. переход от полетной системы координат космического аппарата к какой-либо системе геодезических координат и абсолютных высот. Интерферометрическая обработка имеет высокую степень автоматизации, единственный этап, где необходимо участие оператора — это геокодирование интерферограммы.



Рис. 3. Этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных.

Выбор конкретных алгоритмов для выполнения этапов фильтрации фазового шума и разворачивания фазы оказывает существенное влияние на точность получаемых цифровых моделей рельефа, поэтому выбор алгоритмов, обеспечивающих минимальную погрешность получаемых ЦМР, является важной задачей.

Особенность фильтрации интерферограмм состоит в том, что содержащиеся в них интерференционные полосы при фильтрации не должны размываться (а по возможности, наоборот, подчеркиваться). Поэтому для фильтрации фазового шума применяются адаптивные фильтры, как пространственные, так и работающие в частотной области. Среди адаптивных фильтров фазового шума наибольшее распространение при интерферометрической обработке получил фильтр Гольдштейна (Goldstein filter). Принцип его действия достаточно прост: после вычисления БПФ комплексной

интерферограммы в локальном окне, полученный двумерный спектр $F(i, j)$ преобразуется следующим образом:

$$G(i, j) = |F(i, j)|^{1-\hat{\gamma}} \cdot F(i, j), \quad (5)$$

где $\hat{\gamma}$ — оценка коэффициента когерентности. Для областей с низкой когерентностью оценка коэффициента $\hat{\gamma}$ близка к нулю, и они подвергаются наиболее интенсивной фильтрации; для областей же высокой когерентностью $\hat{\gamma} \approx 1$ и фильтрация практически отсутствует.

Развертывание интерферограммы необходимо для устранения неоднозначности фазовых измерений. Исходная интерферограмма содержит данные об относительной фазе $\Delta\phi_{i,j}$, т. е. фазе, заключенной в интервал $[0, 2\pi]$ или $[-\pi, \pi]$, которая связана с абсолютной (развернутой) фазой соотношением

$$\Delta\psi_{i,j} = \Delta\phi_{i,j} + 2\pi k_{i,j}, \quad (6)$$

где $\Delta\phi_{i,j}$ — относительная фаза, $k_{i,j} \in Z$ — априорно неизвестные целочисленные значения. Процедура нахождения функции абсолютной фазы $\Delta\psi_{i,j}$ по известной интерферограмме $\Delta\phi_{i,j}$ и носит название развёртывания фазы. Именно абсолютные фазовые значения используются для нахождения высоты рельефа. Процедура сводится к добавлению нужного числа фазовых циклов к каждому фазовому измерению. Решение задачи осложняется наличием на интерферограмме фазовых шумов и, так называемых, «разрывов» фазы, что делает решение задачи неоднозначным, сложным теоретически и ёмким вычислительно. Ошибка развёртывания одной интерференционной полосы зависит от геометрии съёмки, длины волны зондирующего сигнала и может быть описана соотношением:

$$\Delta h \approx \lambda H / (B_{\perp} \sin 2\theta_1), \quad (7)$$

где B_{\perp} — нормальная по отношению к направлению съёмки составляющая базы, θ_1 — угол визирования, отсчитываемый от надира. Даже в благоприятных случаях эта ошибка может составлять десятки метров.

Для осуществления операции развёртывания фазы разработано несколько десятков алгоритмов [2, 3], 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. Обзор этих алгоритмов приведен нами в [6]. Метод «растущих пикселей» (Region Growing) — 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:

$$\widehat{\Psi}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot \Psi_{i-m,j-n}}{\sum w_{m,n}}, \quad (8)$$

где $\Psi_{i-m,j-n}$ — набор значений абсолютных фаз (развернутых ранее), $w_{m,n}$ — весовые коэффициенты. Наиболее используемыми на практике являются окна размером 5x5 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 к 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 $\phi_{i,j}$, чтобы ее значение стало наиболее близким к $\widehat{\Psi}_{i,j}$:

$$m = \begin{cases} \left[\frac{\Psi_{i,j} - \phi_{i,j}}{2\pi} \right], & \text{если } \left\{ \frac{\Psi_{i,j} - \phi_{i,j}}{2\pi} \right\} < 0.5; \\ \left[\frac{\Psi_{i,j} - \phi_{i,j}}{2\pi} \right] + 1, & \text{если } \left\{ \frac{\Psi_{i,j} - \phi_{i,j}}{2\pi} \right\} \geq 0.5, \end{cases} \quad (9)$$

где $[]$ и $\{ \}$ — операторы взятия целой и дробной части числа соответственно. Далее выполняется «тест надежности», один из вариантов которого выглядит следующим образом:

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot |\Psi_{i-m,j-n} - \hat{\Psi}_{i,j}|}{\sum w_{m,n}} < 0.7. \quad (10)$$

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 специализированном модуле обработки радиолокационных данных ДЗЗ SARscape.

На заключительном этапе развернутая фаза пересчитывается в цифровую модель местности.

Ошибки, возникающие при интерферометрической съёмке и переносящиеся на погрешности итоговой цифровой модели рельефа, можно условно разделить на две группы: ошибки интерферометрической системы и ошибки радиолокационного канала. К ошибкам интерферометрической системы относятся погрешности определения местоположений РСА, наклонных дальностей, длины и угла наклона базы. К ошибкам радиолокационного канала относятся ошибки, вызванные влияниями различных декорреляций, канала распространения, радиолокационной аппаратуры. Ошибки радиолокационного канала и некоторые ошибки обработки в простейшей постановке рассмотрены в [1], где показано, что основной вклад в снижение точности цифровых моделей рельефа вносит временная декорреляция отражённого сигнала.

Геометрические ошибки (ошибки интерферометрической системы) — это ошибки, связанные с погрешностями измерения геометрических параметров: длины и угла уклона базы, координат спутника (и связанных с ними параметров — высоты и угла визирования), разностной абсолютной (развёрнутой) фазы (или связанной с ней разностной дальности Δr). Найти эти погрешности можно путём дифференцирования выражения (1). Результаты подробного анализа ошибок, связанных с геометрией системы, приведенные нами в [7], показывают, что для некоторых параметров (углов θ и α) требуются измерения с точностью, превосходящей

возможности любых измерительных приборов. Следовательно, построение высокоточной ЦМР земной поверхности по одним только данным космических измерений фактически неосуществимо.

Успешно компенсировать неточное задание параметров съемки позволяет калибровка развёрнутой интерферограммы с помощью наземных опорных точек, плановые и высотная координаты которых известны с высокой точностью (в несколько раз превышающей разрешение снимка и вертикальную точность получаемого рельефа). Координаты опорных точек привязки вычисляются в полевых условиях (GPS-измерения) или берутся с топографической карты, масштаб которой превышает рабочий масштаб. Так, для привязки цифровой модели рельефа для использования в картах масштаба 1:100000 опорные точки желательнее набирать по картам масштаба 1:50000 или 1:25000. Количество опорных точек определяется, в первую очередь, моделью преобразования и количеством неизвестных параметров системы.

3. Экспериментальное исследование методов фильтрации и развертывания фазы Экспериментальные исследования алгоритмов интерферометрической обработки проводились на основе съемки тестовых участков, содержащих как естественные изменения рельефа, так и антропогенные его нарушения (карьеры, отвалы, открытые горные разработки), а также участки растительности разного типа (хвойные и лиственные леса, болота, сельскохозяйственные угодья), объекты с различной отражательной способностью радиоволн (водная поверхность, опоры линий электропередач, железные и автомобильные дороги, городская застройка).

Эталонная ЦМР тестового участка получена по данным планово-высотной основы цифровой топографической карты, согласованной по масштабу с дискретизацией ЦМР. 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.

Критериями оценки качества построения ЦМР являются: точности абсолютного положения контрольных точек в плане и по высоте (среднее абсолютное отклонение); максимальные погрешности контрольных точек в плане и по высоте; среднеквадратические погрешности представления высот контрольных точек. Одним из способов для оценки точности созданной ЦМР является определение погрешностей между сечениями в произвольном направлении полученного и эталонного рельефов.

Для экспериментальной оценки точности использовались два радиолокационных изображения, полученные PCA PALSAR космического аппарата ALOS, пространственное разрешение снимков по наземной дальности составляло около 10 м, период дискретизации по наклонной дальности — 6.5 м, по азимуту — 3.5 м. Радиолокационные изображения в комплексном формате (время съемки — зима 2009 года) были предоставлены ООО «Совзонд» в рамках совместной работы с ФГУП «Уралгеоинформ».

Интерферометрическая обработка проводилась в специализированном программном комплексе SARscape. В ходе исследований произведена оценка качества работы нескольких алгоритмов фильтрации интерферограмм и развертывания фазы. Исследовались следующие алгоритмы фильтрации фазового шума — алгоритмы простого усреднения с адаптивным подбором размера окна (Boxcar), адаптивный пространственный фильтр (Adaptive window) и алгоритм Голдштейна фильтрации в частотной области (Goldstein filter); и следующие алгоритмы развёртывания фазы: алгоритм минимальной стоимости потока (Minimum Cost Flow) и алгоритм «растущих пикселей» (Region Growing). В процессе обработки производилось первоначальное некогерентное накопление с коэффициентами 2 по дальности и 4 по азимуту. Полученная интерферограмма обрабатывалась различными алгоритмами фильтрации фазового шума и развёртывания фазы, после чего производилась её привязка по 7 опорным точкам. Оценка точности полученной ЦМР производилась по среднеквадратичному отклонению от эталона, описанного выше. Результаты представлены в таблице 1.

Таким образом, вертикальная точность цифровой модели рельефа, полученная в результате экспериментов с данными спутника ALOS, оказалась довольно высокой: при разрешении исходных изображений в 10 м она доходила до 7–8 м. Полученной точности цифровой модели рельефа вполне достаточно для создания рельефа цифровых топографических карт масштаба 1:100000 и с оговорками — 1:50000. Такая точность при обработке данных достигается комбинацией из алгоритма фильтрации Goldstein и алгоритма развёртывания Region Growing. Для других алгоритмов значение точности модели рельефа ухудшается вплоть до 17 м. Для радиолокационных данных сверхвысокого разрешения (TerraSAR, CosmoSkyMed, RADARSAT-2) теоретически 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.

Таблица 1. Экспериментальная оценка точности ЦМР
по эталонной модели

Алгоритм фильтрации, развертки фазы	СКО для «естественного» рельефа	СКО для городской территории
<i>Minimum Cost Flow</i>		
Adaptive window	28.23	20.22
Boxcar window	8.50	11.43
Goldstein	7.72	9.70
<i>Region growing</i>		
Adaptive window	17.03	13.16
Boxcar window	8.41	11.43
Goldstein	<u>7.69</u>	9.63

Вывод. Рассмотрены основные принципы, этапы и особенности интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) при построении цифровых моделей рельефа земной поверхности, выбор исходных данных для интерферометрической обработки, ограничений на длину интерферометрической базы и оценки когерентности интерферометрических пар. Предложена оценка когерентности, слабо зависящая от изменчивости топографической составляющей интерферометрической фазы.

Показано, что для обеспечения высокой точности получаемых цифровых моделей рельефа одних орбитальных данных недостаточно, необходимо использование наземных опорных точек для привязки цифровой модели.

На основе экспериментальной обработки фрагментов РЛИ, полученных РСА ALOS PALSAR, показано, что наилучшие результаты по точности дает комбинация из алгоритма фильтрации Гольдштейна (Goldstein) и алгоритма развертывания фазы «растущие пиксели» (Region Growing). Вертикальная точность цифровой модели рельефа, полученная в результате экспериментов при разрешении исходных изображений в 10 м составила 7–8 м. Полученной точности цифровой модели рельефа вполне достаточно для создания рельефа цифровых топографических карт масштаба 1:100 000.

Литература

1. *Hanssen R.F.* Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Kluwer academic publishers, 2002
2. *Goldstein R.M., Li F.K. et al.* Synthetic aperture radar interferometry/ Proceedings of the IEEE, vol. 88, 3 (Mar., 2000), pp. 333–381.

3. Цифровая обработка сигналов в радиофизических приложениях. / Под ред. В.Ф. Кравченко. — М: ФИЗМАТЛИТ, 2007, 544 с.
4. *Wei Xu ; Cumming I.* A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping / IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Volume 37, Issue 1, Part 1, P. 124–134
5. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования/ Под. Ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехния, 2010. 680 с.
6. *Коберниченко В.Г., Сосновский А.В.* Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки // Физика и технические приложения волновых процессов. 2010. Т. 13. № 3. С. 98–106.
7. *Сосновский А.В., Коберниченко В.Г.* О точности цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С. 122–129.

Коберниченко Виктор Григорьевич — канд. техн. наук, доцент; профессор кафедры теоретических основ радиотехники Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Область научных интересов: радиолокационные системы с синтезированной апертурой, цифровая обработка информации в радиоэлектронных системах космического дистанционного зондирования Земли, применение информационных технологий в задачах обеспечения природной и техногенной безопасности. Число научных публикаций — более 250. vgkobern@mail.ru. УрФУ, ул. Мира, д. 32, 620002, РФ; р.т. +7(343)375-44-93

Kobernichenko Victor Grigogievich — Cand. Tech. Sci.; a professor of theoretical bases of radio engineering department of The Ural Federal University (UrFU). Major scientific interests are SAR systems, digital signal processing in remote sensing systems, an application of information technologies in environmental and technogenic safety. The number of publications — over 250. vgkobern@mail.ru. UrFU, Mira str., 32, 620002, Russia; office phone: +7(343)375-44-93

Сосновский Андрей Васильевич — старший преподаватель кафедры теоретических основ радиотехники Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Область научных интересов: радиолокационные системы с синтезированной апертурой, цифровая обработка информации в радиоэлектронных системах космического дистанционного зондирования Земли. Число научных публикаций — более 30. sav83@e1.ru. УрФУ, ул. Мира, д. 32, 620002, РФ; р.т. +7(343)375-44-93

Sosnovsky Andrey Vasilievich — a senior lecturer of theoretical bases of radio engineering department of The Ural Federal University (UrFU). Major scientific interests are SAR systems, digital signal processing in remote sensing systems. The number of publications — over 30. sav83@e1.ru. UrFU, Mira str., 32, 620002, Russia; office phone: +7(343)375-44-93

Рекомендовано Институтом радиотехники и информационных технологий УрФУ, заместитель директора института Шабунин С.Н., д-р техн. наук, доцент
Статья поступила в редакцию 13.06.2013

РЕФЕРАТ

Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии.

В статье рассматриваются основные принципы, этапы и особенности интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) при построении цифровых моделей рельефа земной поверхности, а также приводятся результаты экспериментов по оценке вертикальной точности получаемых цифровых моделей рельефа. Также рассматриваются вопросы выбора исходных данных для интерферометрической обработки, ограничений на длину интерферометрической базы и оценки когерентности интерферометрических пар; предлагается оценка когерентности, слабо зависящая от изменчивости топографической составляющей интерферометрической фазы. Показано, что для обеспечения высокой точности получаемых цифровых моделей рельефа одних орбитальных данных недостаточно, необходимо использование наземных опорных точек для привязки цифровой модели.

В результате статистического анализа экспериментально полученной по данным радиолокатора PALSAR космического аппарата ALOS (длина волны 23 см) ЦМР тестового участка показано, что вертикальная точность модели значительно зависит от используемых алгоритмов фильтрации фазового шума и развёртывания интерферометрической фазы. В наилучшем случае, при использовании алгоритма фильтрации Goldstein и алгоритма развёртывания Region Growing, составила 7–8 м при пространственном разрешении радиолокатора примерно в 10 м. Такой точности может быть достаточно для создания рельефа цифровых топографических карт масштаба 1:100 000 и карт более мелких масштабов.

SUMMARY

Kobernichenko V.G., Sosnovsky A.V. **Particular qualities of digital elevation maps generation in Interferometric SAR technology**

In this article the basic principles, stages and features of the interferometric data processing in space synthetic aperture radar (SAR) for the earth digital elevation maps (DEMs) generation, as well as the results of experiments for the DEM vertical accuracy estimation, are considered. The features about the choice of input data for interferometric processing, the restrictions on interferometric baseline and coherence estimation are also considered; a coherence estimate with a weak dependence on the topographic phase variability is proposed. It is shown that the orbital data are insufficient for achievement of the high DEM accuracy, the ground control points utilization for DEM registration is required.

The analysis for DEMs generated from ALOS PALSAR data (23 cm wavelength) shows that the vertical DEM accuracy is substantially dependent on the phase noise filtration and phase unwrapping algorithms applied for processing. In the best case, with the application of Goldstein phase noise filtration algorithm and region growing phase unwrapping algorithm, the DEM vertical accuracy is about 7–8 m at radar spatial resolution of about 10 m. This accuracy may be sufficient for DEM generation for 1:100000 scaled maps and less.