

## О точности цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии

А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mails: sav83@e1.ru, vgkobern@mail.ru*

Исследуются вопросы вертикальной точности цифровых моделей рельефа, полученных с помощью интерферометрической съемки космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой. Рассмотрены факторы геометрического характера, влияющие на точность получаемой информации. Сделан вывод о необходимости вычисления параметров системы на основе привязки к имеющимся картографическим материалам с использованием наземных опорных точек.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, интерферометрическая съемка, цифровая модель рельефа, калибровка, опорная точка.

### Введение

Одним из перспективных методов получения информации о рельефе местности, является интерферометрическая обработка данных, получаемых космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА). Информация о высоте рельефа при интерферометрической съемке получается за счет определения разности фаз отраженных от элемента местности сигналов, полученных либо разными антеннами, либо на разных орбитах при почти одинаковой геометрии съемки. Широко известны созданные с помощью системы такого типа общедоступные данные цифровой карты высот поверхности земли SRTM-3 (плановая дискретизация 90 м), полученные в ходе выполнения проекта Shuttle Radar Topographic Mission. Появление космических РСА нового поколения, таких, как ALOS PALSAR, RADARSAT-2, TerraSAR-X, CosmoSkyMed открыли новые возможности для построения детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) (Верба и др, 2010; Никольский, 2008).

Ошибки, возникающие при построении ЦМР методом космической радиолокационной интерферометрии, можно условно разделить на две группы: ошибки интерферометрической системы и ошибки радиолокационного канала. К ошибкам интерферометрической системы относятся погрешности определения местоположения РСА, наклонных дальностей, длины и угла наклона базы. К ошибкам радиолокационного канала относятся ошибки, вызванные влияниями декорреляции отраженного сигнала; ошибки канала распространения; ошибки, вызываемые радиолокационной аппаратурой.

Ошибки радиолокационного канала и некоторые ошибки обработки достаточно подробно рассмотрены в (Hannsen, 2001; Joughin, 2000), где показано, что основной вклад в снижение точности цифровых моделей рельефа вносит временная декорреляция отраженного сигнала, которая трудно поддается априорной оценке. В настоящей статье подробно рассмотрены ошибки, связанные с геометрией системы.

### Геометрические ошибки в РСА-интерферометрии

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) и разностной абсолютной (развёрнутой) фазы  $\Delta\Phi$  (или разностной дальности  $\Delta r$ , связанной с

ней выражением  $\Delta\Phi = 4\pi\Delta r / \lambda$ . Найти эти погрешности можно путём дифференцирования выражения для связи  $\Delta\Phi$  и высоты  $h$  (см. рис. 1а):

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

$$\left. - \sin \alpha \cdot \frac{B^2 - \left( \Delta\Phi \cdot \lambda / 4\pi \right)^2 + 2r_1 \left( \Delta\Phi \cdot \lambda / 4\pi \right)}{2Br_1} \right).$$

Приведём картину, как это принято в РСА-интерферометрии, к геометрии дальней зоны, при этом образ элементарного участка поверхности  $C$  (рис.1а, 1в) будем проецировать на опорную поверхность так, как указано на рис. 1в (точка  $C'_{01}$ ), тогда рельеф впоследствии будет удобно рассматривать как функцию  $h(x,y)$ . В таком случае легко показать, что приближённая формула связи высоты и разностной фазы преобразуется к следующему виду:

$$h \approx \frac{(\Delta\Phi - \Delta\Phi_0) \cdot \lambda \cdot r_1}{4\pi \cdot B \cos(\theta_0 - \alpha) \cdot \sin \theta_0}. \quad (2)$$

Используя выражение (2), можно легко найти (путём дифференцирования по соответствующим параметрам) приближённые выражения для чувствительности высоты к ошибкам измерения геометрических параметров ( $B$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $H$ ) и разностной дальности  $\Delta r$ , а из чувствительностей вычислить сами ошибки, при этом удобно воспользоваться тем, что  $\Delta r \approx \Delta r_0 = B \cdot \sin(\theta_0 - \alpha)$ :

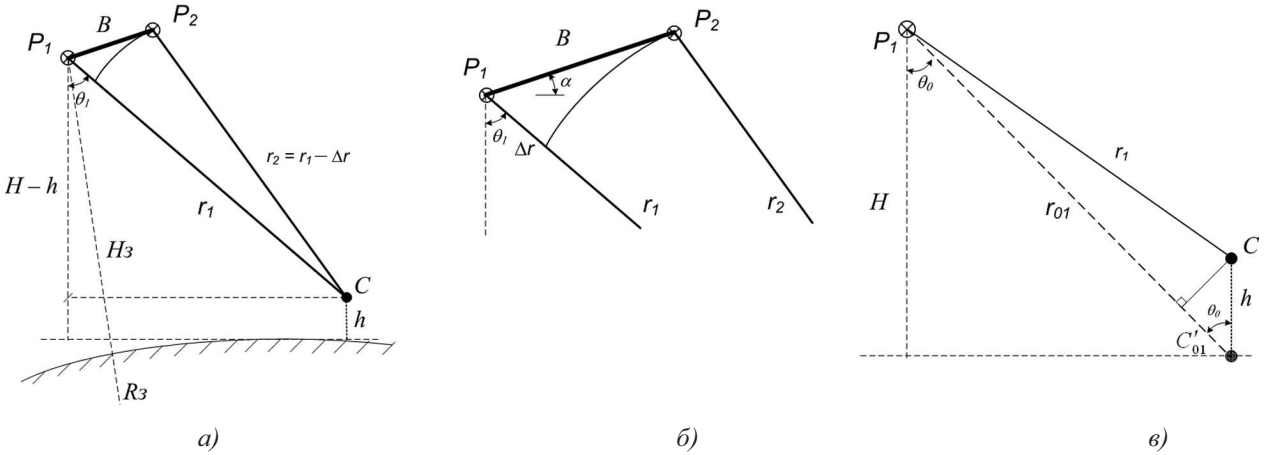


Рис. 1. Геометрия космической радиолокационной интерферометрической съемки в вертикальной плоскости

$$\sigma_h = -\frac{H}{B} \cdot \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \alpha)}{\cos \theta_0} \sigma_B; \quad (3)$$

$$\sigma_h = -\frac{H \cdot [1 + \sin^2(\theta_0 - \alpha)]}{\cos^2(\theta_0 - \alpha) \cdot \cos \theta_0} \sigma_\alpha; \quad (4)$$

$$\sigma_h = \frac{H \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg} \theta_0}{4\pi \cdot B \cos(\theta_0 - \alpha)} \sigma_\phi ; \quad (5)$$

$$\sigma_h = \frac{H \cdot \operatorname{tg}(\theta_0 - \alpha)}{\lambda \cdot \cos \theta_0} \sigma_\lambda ; \quad (6)$$

$$\sigma_h = \left[ \frac{H \cdot \sin(2\theta_0 - \alpha) \cdot \operatorname{tg}(\theta_0 - \alpha)}{\cos \theta_0} - \frac{H}{\cos^2(\theta_0 - \alpha) \cdot \cos \theta_0} - \frac{H \cdot \operatorname{tg} \theta_0 \cdot \operatorname{tg}(\theta_0 - \alpha)}{\cos \theta_0} \right] \cdot \sigma_\theta ; \quad (7)$$

$$\sigma_h = \sigma_H ; \quad (8)$$

Рассмотрим каждую из этих ошибок более подробно. Учтём, что для космической радиолокационной съёмки характерны следующие значения параметров: угол визирования  $\theta$  лежит в пределах от 20 до 60 градусов, что обусловлено ограничениями радиолокационного бокового обзора; угол наклона базы  $\alpha$  примерно равен нулю, поскольку высота орбиты, как правило, сохраняется постоянной; высота орбиты  $H$  составляет 200-1000 км.

**Длина базы  $B$**  может принимать любые значения в интервале от нуля до величины  $B_{\text{крит}}$ , которая может доходить до нескольких десятков километров. При указанных значениях углов величины  $\cos \theta_0$  и  $\operatorname{tg}(\theta_0 - \alpha)$  будут иметь порядок 0.1...1. Отсюда можно получить, что  $\sigma_h \sim 10^2 \dots 10^3 \cdot \sigma_B$ , т.е. ошибка измерения длины базы в 1 мм приведёт к погрешности определения высоты в 0.1...1 м (при этом не учитывается влияние остальных четырёх погрешностей и прочих факторов). Такая точность на несколько порядков превосходит возможности современных систем глобального позиционирования, даже при их работе в дифференциальном режиме. Для систем с жёсткой базой проблему измерения  $B$  можно решить с помощью лазерного дальномера, для систем же с синтезированной базой необходимо использовать принципиально другой подход, описанный ниже.

**Угол уклона базы  $\alpha$** . При указанных ранее условиях и считая, что

$$\frac{1 + \sin^2(\theta_0 - \alpha)}{\cos^2(\theta_0 - \alpha) \cdot \cos \theta_0} \sim 1, \quad (9)$$

получаем, что  $\sigma_h \sim 10^5 \cdot \sigma_\alpha$ , т.е. для получения приемлемых значений  $\sigma_h$  требуется относительная погрешность измерения угла уклона базы в  $10^{-5}$ . Такая точность также труднодостижима для систем с синтезированной базой.

**Разностная фаза  $\Delta\Phi$** . Строго говоря, рассматриваемым параметром является не сама разностная фаза, а разностная дальность  $\Delta r$ , связанная с ней через коэффициент  $4\pi / \lambda$ . Именно поэтому, при увеличении длины базы может происходить увеличение точности, т.к. увеличивается число интерференционных полос, и погрешность определения  $\Delta r$  будет зависеть в большей степени от правильности развёртывания фазы и в меньшей – от неточности измерения фаз. С другой стороны, при увеличении базы возрастает интерференционный шум. Для используемых в РСА дистанционного зондирования Земли длинах волн (3...21 см) погрешность определения высоты в соответствии с (5) имеет порядок  $\sigma_h \sim 10 \cdot \sigma_\phi$ , т.е. для получения погрешности по высоте в 1 м фаза должно быть измерена с точностью в  $5.7^\circ$ . С.к.о. фазового шума (которое определяет погрешность измерения фазы), может превосходить это значение, однако после развёртывания фазы оно уменьшается в число раз, равное количеству интерференционных полос, оставшихся на интерферограмме после устранения линейного набега фазы. Это число определяется параметрами системы и свойствами рельефа (диапазоном высот) по формуле:

$$N = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h'_A}, \quad (10)$$

где  $h'_A$  – высота неоднозначности после устранения линейного набега фазы. Как правило,  $N$  принимает значения от нескольких единиц до нескольких десятков и растёт с увеличением длины базы.

Таким образом, погрешность измерения фазы является менее критичным фактором при интерферометрической съёмке, чем погрешности определения длины и угла уклона базы, однако, как будет показано далее, в отличие от них она не устраняется с помощью калибровки цифровой модели рельефа.

**Длина волны  $\lambda$ .** Из формулы (7) следует, что, например, для РСА с длиной волны в 3 см погрешность определения высоты составит величину порядка  $2 \cdot 10^7 \cdot \sigma_\lambda$ . Учитывая, что нестабильность частоты современных кварцевых генераторов достигает величин порядка  $10^{-6} \dots 10^{-8}$ , фактор нестабильности частоты можно считать менее существенным по сравнению с тремя предыдущими, однако не во всех случаях его можно полагать пренебрежимо малым.

Доплеровское смещение (порядка  $10^{-5}$ ) при правильной организации съёмки и корректной первичной обработке данных само по себе не оказывает существенного влияния на точность системы, поскольку соответствующие набеги компенсируются при вычислении интерферограммы.

**Угол визирования  $\theta$ .** Несмотря на то, что формулы для определения влияния углов  $\alpha$  (5) и  $\theta$  (8) значительно отличаются, влияние погрешности измерения  $\theta$  будет похожим:  $\sigma_h \sim 10^7 \sigma_\theta$ .

**Высота орбиты  $H$ .** Как видно по формуле (9), величина погрешности измерения высоты орбиты  $H$  полностью переносится на оценку измерения высоты элемента рельефа  $h$ .

Оценим указанные погрешности для двух съёмочных систем: 1) радиолокатора ALOS PALSAR в режиме Hi-resolution при одной ГГ-поляризации ( $H = 691$  км,  $B_{кр\perp} = 19.5$  км,  $\lambda = 23.6$  см); 2) радиолокатора спутника TerraSAR-X (690 км, 3.6 км и 3.1 см соответственно) в режиме Strip при одной поляризации. Полагаем,  $B = 0.5 B_{кр}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\theta = 35^\circ$ . Погрешности измерения параметров, при которых погрешность измерения высоты элемента цифровой модели рельефа ( $\sigma_h$ ) составит 1 м, сведены в таблицу 1.

Как можно видеть из таблицы, для некоторых параметров (углов  $\theta$  и  $\alpha$ ) требуется измерение с точностью, превосходящей возможности любых измерительных приборов. Следовательно, построение высокоточной ЦМР земной поверхности по одним только данным космических измерений фактически неосуществимо.

Таблица 1. Требуемые точности измерения отдельных параметров интерферометрической системы для получения  $\sigma_h = 1$  м

Параметр	ALOS PALSAR	TerraSAR-X
$\sigma_B$	2 см	5 мм
$\sigma_\alpha$	$3 \cdot 10^{-5}^\circ$	$5 \cdot 10^{-5}^\circ$
$\sigma_\varphi$	$61^\circ$	$116^\circ$
$\sigma_\lambda$	$4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_\theta$	$1 \cdot 10^{-6}^\circ$	$1.3 \cdot 10^{-6}^\circ$

## Уменьшение геометрических ошибок с помощью калибровки по опорным точкам

Успешно компенсировать неточное задание параметров съёмки позволяет калибровка картины 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 желательно набирать по картматериалам масштаба 1:50000 или 1:25000.

Количество опорных точек определяется, в первую очередь, моделью преобразования и количеством неизвестных параметров системы. Будем считать, что траектория носителя известна с хорошей точностью. Покажем, что в этом случае трёх опорных точек достаточно для привязки элементов интерферограммы к местности (в системе плоских прямоугольных координат), восстановления параметров  $H$ ,  $B$  и  $\alpha$ , устранения нелинейной зависимости высоты рельефа от разностной фазы. Поскольку искажения происходят только в плоскости дальностной координаты, которая перпендикулярна линии пути, то ограничимся вначале вычислением следующей связи:

$$(m_k, \Delta\psi_k) \rightarrow (y_k, h_k) . \quad (11)$$

Здесь в первой паре скобок записаны номер элемента  $m_k$  в строке интерферограммы и соответствующее ему значение развёрнутой фазы  $\Delta\psi_k$ ; во второй паре скобок наземная дальностная координата  $y_k$  высота  $h_k$ , соответствующие элементу интерферограммы  $(m_k, \Delta\psi_k)$ . Номер элемента  $m_k$  однозначно связан с наклонной дальностью  $r_{1k}$  от РСА до соответствующего элемента земной поверхности  $(x_k, y_k)$  при первой съёмке, поэтому наклонную дальность до каждого элемента интерферограммы можно считать известной величиной. Составим уравнения относительно наклонных дальностей при первой и второй съёмках в некоторой опорной точке  $i$ :

$$r_{1i}^2 = (H - h_i)^2 + y_i^2 , \quad (12)$$

$$r_{2i}^2 = (H - h_i + B \sin \alpha)^2 + (y_i - B \cos \alpha)^2 . \quad (13)$$

По первому уравнению с использованием всего лишь одной опорной точки легко определить высоту  $H$ , которая в условиях космической съёмки земной поверхности будет иметь смысл расстояния от КА до плоскости, касательной к земной поверхности (эллипсоиду). В этой плоскости лежит прямоугольная система координат  $(x, y)$ . Затем, полагая  $H$  известной, найдём параметры  $B$  и  $\alpha$  из системы уравнений вида (13), составленной для нескольких опорных точек  $i$ . С помощью нескольких эквивалентных преобразований уравнение (13) можно привести к следующему виду:

$$\partial r_i = B^2 + 2B \times [(H - h_i) \sin \alpha - y_i \cos \alpha] , \quad (14)$$

где  $\partial r_i = r_{2i}^2 - r_{1i}^2$ . Данное уравнение является существенно нелинейным относительно  $B$  и  $\alpha$ , однако его решение можно линеаризовать, если ввести три неизвестных величины следующим образом:

$$z_1 = B ; \quad z_1 \cdot t_2 = \sin \alpha ; \quad z_1 \cdot t_3 = \cos \alpha .$$

Тогда получаем, что

$$t_1 \cdot \partial r_i = 1 + (H - h_i) t_2 - y_i t_3, \quad (15)$$

где  $t_1 = 1/z_1^2$ . Получившееся уравнение (15) является линейным, а неизвестные величины  $t_1, t_2, t_3$  и однозначно связанные с ними  $B$  и  $\alpha$  могут быть найдены при решении системы из трёх таких уравнений (т.е. с помощью трёх опорных точек).

После нахождения всех неизвестных параметров системы значения высот рельефа  $h_k$  могут быть вычислены для всех элементов интерферограммы по формуле (1) или (2), а координата наземной дальности, относящаяся к этому элементу, вычисляется, как

$$y_i = \sqrt{r_{1i}^2 - (H - h_i)^2}. \quad (16)$$

К совокупности (созвездию) опорных точек можно сформулировать следующие требования:

- в качестве опорных точек следует выбирать только хорошо опознаваемые элементы местности (как правило – пересечение линейных объектов антропогенного происхождения). При этом следует иметь в виду, что именно в пределах линейного объекта часто наблюдается эффект потери когерентности (некогерентная полоса шириной не более 1-2 пикселей), поэтому при расстановке опорных точек следует сверяться с картой когерентности. Зачастую точку целесообразнее выбирать не непосредственно в месте пересечения, а на отдалении в 3-4 пикселя от него (одновременно внося соответствующую поправку в координаты);
- границы созвездия опорных точек должны охватывать всю область интереса, и равномерно распределяться как в её пределах, так и в пределах диапазона изменения высот. Это необходимо для хорошей обусловленности систем уравнений (12-14). Желательно, чтобы 4 опорные точки располагались как можно ближе к углам интерферограммы;
- не следует брать точки в зонах с низкой когерентностью и на их границах;
- на снимках среднего разрешения ( $>3 \dots 5$  м) не следует брать опорные точки в местах плотной городской застройки, поскольку получаемые значения высот ЦМР для этих территорий будут соответствовать некоторой промежуточной высоте между высотой земной поверхности и высотами зданий (см. табл. 2). Аналогично для данных РСА С-диапазона и более коротковолновых диапазонов длин волн не следует брать опорные точки в местах расположения густой лесной растительности.

Следует отметить, что даже при неудачно выбранных опорных точках точность получаемой цифровой модели рельефа будет выше, чем при её создании на основе одних только орбитальных данных.

### Экспериментальные результаты

Для экспериментальной оценки точности использовались два радиолокационных изображения РСА 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.

Интерферометрическая обработка производилась в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. (Коберниченко, Сосновский, 2010). 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.



Рис. 2. Этапы интерферометрической обработки данных

Точность полученной ЦМР оценивалась по среднеквадратичному отклонению от эталона, в качестве которого выступала ЦМР, полученная по цифровой топографической карте с высотой сечения рельефа 5 м (среднее квадратичное отклонение – менее 2 м). Результаты представлены в таблице 2. Наилучшую вертикальную точность (порядка 7,5 м) обеспечили алгоритм фильтрации в частотной области (алгоритм Гольдштейна) и алгоритм растущих пикселей (Region Growing) для развёртывания фазы. Кроме сравнения с картографическим эталоном проводилась также и оценка точности по данным GPS-измерений, в 7 контрольных точках (таблица 3). Полученные значения с.к.о. близки к результатам сравнения по картографическому эталону.

Таблица 2. Экспериментальная оценка точности ЦМР по эталонной модели

Алгоритм фильтрации, развертки фазы	СКО для «естественного» рельеф	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

Таблица 3. Экспериментальная оценка точности ЦМР по контрольным точкам (алгоритм развёртывания фазы – Region Growing)

№ к.т.	Эталон. высота (GPS), м	Отклонения от эталона, м		
		Adaptive	Boxcar	Goldstein
1	214,04	-8,96	-1,96	-10,96
2	185,38	-17,62	-6,62	-14,62
3	206,1	-6,9	-6,9	-8,9
4	227,31	-12,69	0,31	2,31
5	212,24	46,24	9,24	4,24
6	192,72	-15,28	-9,28	-7,28
7	186,48	1,48	-13,52	-10,52
<b>СКО:</b>		22,16	7,44	<u>7,09</u>

## Литература

1. Hanssen R. F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001. 308 p.
2. Joughin I.R., F. K. Li, S.N. Madsen, E. Rodrigues, R.M. Goldstein. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *IEEE Proc.*, vol. 88, №3, 2000
3. 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.

4. *Никольский Д.Б.* Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // Геоматика. 2008. №1. С.7–10.
5. *Коберниченко В.Г., Сосновский А.В.* Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съёмки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. №3. С. 98–106.

## **An accuracy estimation for digital elevation models obtained with interferometric synthesized aperture radars (InSAR)**

**V.G. Kobernichenko, A.V. Sosnovsky**

*Yeltsin Ural Federal University  
620002 Russia, Ekaterinburg, 19 Mira str.  
E-mails: vgkobern@mail.ru, sav83@e1.ru;*

Some questions dealt with accuracy estimation of digital elevation model obtained by InSAR systems are analyzed. An influence of geometry-induced factors on model's vertical accuracy is examined. A conclusion about the necessity of utilization of ground control calibration for model calibration is made.

**Keywords:** Synthesized aperture radars, InSAR, digital elevation models, accuracy estimation.