

И.В. Оньков (ЗАО «Мобиле», Пермь)

В 1970 г. окончил МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». В настоящее время — научный консультант ЗАО «Мобиле» (Пермь). Кандидат технических наук, доцент.

Оценка точности построения ЦМР методом радарной интерферометрии по снимкам ALOS/PALSAR

ВВЕДЕНИЕ

Метод радарной интерферометрии по данным РЛС космического базирования является одним из наиболее эффективных методов определения смещений земной поверхности на больших площадях. Для успешной реализации этого метода, помимо достаточно длинной серии радарных снимков (15–30) на изучаемую территорию, необходима также априорная информация о рельефе данной местности [1]. На территориях в полосе широт от 53° ю.ш. до 60° с.ш. в настоящее время для этой цели используют глобальную цифровую модель рельефа (ЦМР) SRTM, которая обеспечивает в большинстве случаев необходимую точность определения высот. Однако для значительной части нашей страны, севернее 60°, возникает необходимость построения ЦМР собственными силами, например по тем же радарным данным, которые предполагается использовать для определения смещений, либо по картографическим материалам. В свою очередь, для построения качественной ЦМР методом радарной интерферометрии желательно иметь хотя бы приближенную информацию о рельефе местности в виде опорной (входной) ЦМР или по крайней мере знать среднюю высоту земной поверхности на выбранную территорию.

В данной работе исследована точность построения ЦМР интерферометрическим методом по парам радарных снимков ALOS/PALSAR как без использования входной ЦМР, со средним значением высоты земной поверхности, так и с использованием глобальных ЦМР GTOPO30 и SRTM в качестве опорных. Модель GTOPO30 практически полностью покрывает поверхности Земли, за исключением приполярных областей, и также находится в свободном доступе в Интернете. Однако по точности высот и детальности (шаг сетки 30") она заметно уступает модели рельефа SRTM с шагом сетки 3".

Выбранная для построения ЦМР территория — город Пермь и пригороды, размером 30 на 25 км, площадью 750 квадратных километров, из которых около 10% занимает многоэтажная городская застройка, 20% — пригородная зона с застройкой сельского типа, 30% — сельхозугодья и 40% — лесные массивы (рис. 1).

Характер рельефа местности на исследуемой территории достаточно разнообразен — от плоско-равнинного, с преобладающими углами наклона менее 1 градуса, до пересеченного, с углами наклона земной поверхности более 6 градусов. Общий перепад высот в пределах выбранного участка составляет примерно 160 м.



Рис. 1. Выбранная для построения ЦМР территория города Перми с контрольными точками

ПОСТРОЕНИЕ ЦМР ПО РАДАРНЫМ СНИМКАМ

Для построения ЦМР использовалась многопроходная серия радарных снимков ALOS/PALSAR, выполненных с 23.01.2008 по 16.12.2010 г. Из 12 снимков с поляризацией HH, образующих 66 пар, было выбрано 8 пар с временными базами 46, 92, 138 и 368 дней с отношением пространственного базиса B к его критическому значению $B_{\partial\partial}$, в интервале $\sim 0.05 - 0.15$, для которых значения разности высот $\Delta H_{2\pi}$, соответствующие изменению фазы на 2π , близки к перепаду высот на выбранной территории (табл. 1).

Обработка снимков проводилась в программном продукте ENVI SARscape по стандартной методике [2]:

- оценка базисных линий;
- создание интерферограмм;
- адаптивная фильтрация (метод Goldstain) и расчет когерентности;
- развертка фазы (метод MCF);

- коррекция орбит по наземным опорным точкам (GCP);
- пересчет фазы в высоты;
- геокодирование ЦМР в систему WGS-4, проекции UTM-40 (шаг сетки 50 м).

Создание интерферограмм выполнялось в трех вариантах: без входной ЦМР и с входными ЦМР GTOPO30 и SRTM.

Опорными точками для коррекции орбит (GCP) служили 25 наземных пунктов, координаты и высоты которых были определены из GPS-наблюдений.

В общей сложности было построено 24 радарных ЦМР, из которых вырезались прямоугольные фрагменты размером 25х30 км на исследуемую территорию г. Перми и преобразовывались в матрицы высот с шагом сетки 50х50 м.

Оценка точности выполнялась по разности высот ΔH радарных ЦМР H_{DEM} и топографической поверхности H_{Topo} на контрольных точках:

$$\Delta H = H_{DEM} - H_{Topo}$$

Координаты и высоты H_{Topo} 90 контрольных точек были определены из GPS-наблюдений (на рис. 1 показаны красным цветом). Значения H_{Topo} вычислялись по высотам в узлах сетки интерполированным кубическими полиномами.

В качестве основных показателей точности высот радарных ЦМР были приняты следующие параметры:

- среднее значение разности высот $\overline{\Delta H}$ (систематическая ошибка);
- средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\Delta H}$;
- средняя абсолютная ошибка $MAE_{\Delta H}$;
- вероятная линейная ошибка $LE90_{\Delta H}$;
- минимальное ΔH_{min} и максимальное ΔH_{max} значения ошибок.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫСОТ ЦМР ПО КОНТРОЛЬНЫМ GPS-ТОЧКАМ

Полученные значения оценок параметров точности радарных ЦМР, без входной ЦМР и для двух видов входных ЦМР GTOPO30 и SRTM, приведены в табл. 2–4.

Таблица 1

Основные характеристики пар снимков, принятых в обработку

Параметр	Номера пар снимков							
	03-07	06-08	06-09	07-08	07-09	08-09	10-11	11-12
ΔD , дни	368	92	138	46	92	46	46	138
B , м	538,0	627,9	1030,2	582,5	983,2	402,8	327,6	659,6
$B_{\hat{\epsilon}\partial}$, м	6583,5	6590,3	6590,3	6588,1	6588,1	6584,4	6383,8	6591,5
$B/B_{\hat{\epsilon}\partial}$	0,082	0,095	0,156	0,088	0,149	0,061	0,051	0,100
$\Delta H_{2\pi}$, м	120,2	103,1	62,8	111,1	65,8	160,6	197,4	67,5

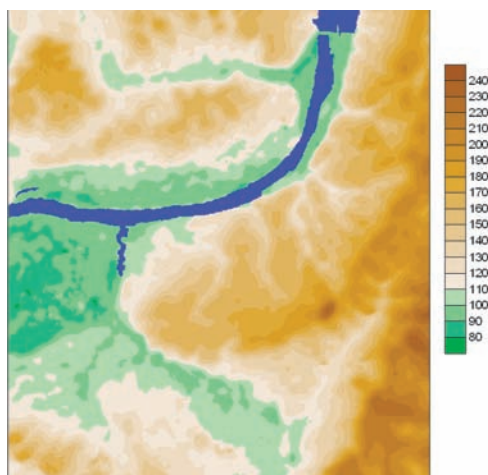


Рис. 2. Пример ЦМР, построенной по пяти парам радарных снимков медианным осреднением без входной ЦМР

Анализируя результаты, приведенные в табл. 2–4, можно отметить два основных момента:

- использование при обработке входных ЦМР GTOPO30 и SRTM не приводит к существенному повышению точности высот радарных ЦМР по сравнению с вариантом построения моделей без входной ЦМР;
- величина интервала времени между двумя снимками пары ΔD (табл. 1), также практически не влияет на точность высот радарных ЦМР, причем показатели точности пар 03–07 и 06–09 с временным базисами 368 и 138 дней даже лучше, чем

аналогичные показатели для пар 08–09 и 10–11 с временным базисом 46 дней.

Следует также отметить неоднородность полученных результатов: ошибки высот радарных ЦМР для последних трех пар (08–09, 10–11, 11–12) в 2–4 раза больше, чем для первых пяти пар, вне зависимости от временного базиса и вида входной ЦМР. В дальнейшем при оценке точности осредненных ЦМР указанные пары снимков 08–09, 10–11 и 11–12 не учитывались.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫСОТ ОСРЕДНЕННЫХ ЦМР ПО КОНТРОЛЬНЫМ GPS-ТОЧКАМ

Для построения осредненных ЦМР использовались два варианта вычисления высот в узлах сетки 50x50 м. В первом варианте за значение высоты в узлах сетки принималось среднее арифметическое из пяти значений высот радарных ЦМР: 03–07, 06–08, 06–09, 07–08, 07–09. Во втором варианте за высоту в узлах сетки принималась медиана из этих же значений высот. Как известно из математической статистики, медиана как оценка среднего более устойчива к присутствию в выборке резко выделяющихся наблюдений [3]. Пример осредненной ЦМР, построенный по алгоритму медианы, приведен на рис. 2.

Показатели точности высот осредненных ЦМР без входной ЦМР и с входными ЦМР: GTOPO30 и SRTM v.4 и двух вариантов вычисления высот ЦМР в узлах сетки приведены в табл. 5. Значения медианы приведены в скобках.

Сравнение результатов оценки точности радар-

Таблица 2

Показатели точности высот радарных ЦМР (без входной ЦМР)

Параметр точности	Номера пар снимков							
	03-07	06-08	06-09	07-08	07-09	08-09	10-11	11-12
ΔH , м	1,85	1,90	3,06	1,72	2,78	2,04	5,63	4,66
$RMSE_{\Delta H}$, м	5,14	4,56	5,24	4,65	5,01	7,78	13,52	19,62
$MAE_{\Delta H}$, м	4,02	3,34	4,12	3,68	3,97	6,37	11,42	14,47
$LE90_{\Delta H}$, м	9,10	7,83	8,86	6,63	8,56	13,53	21,76	37,35
ΔH_{min} , м	-11,10	-8,57	-6,32	-9,72	-5,65	-16,51	-20,81	-56,43
ΔH_{max} , м	13,57	17,80	12,77	15,19	11,80	15,02	26,85	49,75

Таблица 3

Показатели точности высот радарных ЦМР (входная ЦМР — GTOPO30)

Параметр точности	Номера пар снимков							
	03-07	06-08	06-09	07-08	07-09	08-09	10-11	11-12
ΔH , м	1,35	1,64	2,24	2,01	2,04	1,76	5,51	1,26
$RMSE_{\Delta H}$, м	5,01	4,48	4,50	4,86	4,09	7,37	13,51	7,22
$MAE_{\Delta H}$, м	4,07	3,28	3,50	3,79	3,18	6,14	11,52	5,88
$LE90_{\Delta H}$, м	7,88	7,84	8,29	8,38	7,71	11,86	20,69	12,08
ΔH_{min} , м	-11,60	-6,91	-4,44	-8,75	-6,63	-18,02	-20,69	-12,10
ΔH_{max} , м	13,64	16,72	11,72	14,20	10,17	14,38	26,32	16,28

Таблица 4

Показатели точности высот радарных ЦМР (входная ЦМР — SRTM)

Параметр точности	Номера пар снимков							
	03-07	06-08	06-09	07-08	07-09	08-09	10-11	11-12
ΔH , м	2,10	2,94	3,07	2,38	2,88	2,74	5,88	2,25
$RMSE_{\Delta H}$, м	5,17	4,57	4,67	4,24	4,37	7,62	11,51	8,43
$MAE_{\Delta H}$, м	4,00	3,71	3,73	3,34	3,49	6,31	9,77	7,13
$LE90_{\Delta H}$, м	9,39	7,23	8,06	6,99	8,20	12,01	18,72	14,08
ΔH_{min} , м	-13,21	-3,57	-4,28	-4,13	-6,96	-18,88	-22,37	-14,97
ΔH_{max} , м	12,00	14,21	14,11	11,23	10,34	16,54	25,81	16,85

Таблица 5

Показатели точности высот осредненных ЦМР относительно топографической поверхности для алгоритмов среднего арифметического и медианы (в скобках)

Параметр точности	Без входной ЦМР	Входная ЦМР	
		ГТОРО30	SRTM
ΔH , м	2,26 (2,21)	1,86 (1,94)	2,67 (2,68)
$RMSE_{\Delta H}$, м	4,04 (3,99)	3,57 (3,79)	3,73 (3,76)
$MAE_{\Delta H}$, м	3,29 (3,19)	2,76 (2,82)	3,05 (3,08)
$LE90_{\Delta H}$, м	7,25 (7,14)	6,86 (7,26)	6,19 (6,25)
ΔH_{min} , м	-6,55 (-5,65)	-4,48 (-3,56)	-2,95 (-3,27)
ΔH_{max} , м	9,43 (9,90)	8,97 (10,34)	8,97 (8,70)

Таблица 6

Показатели точности высот осредненных ЦМР относительно модели SRTM для алгоритмов среднего арифметического и медианы (в скобках)

Параметр точности	Без входной ЦМР	Входная ЦМР	
		ГТОРО30	SRTM
ΔH , м	1,45 (1,20)	1,37 (0,93)	1,59 (1,67)
$RMSE_{\Delta H}$, м	3,14 (3,24)	3,33 (3,40)	2,81 (3,31)
$MAE_{\Delta H}$, м	2,38 (2,57)	2,61 (2,73)	2,18 (2,77)
$LE90_{\Delta H}$, м	5,34 (5,96)	5,95 (5,58)	5,12 (5,62)
ΔH_{min} , м	-5,47 (-8,06)	-6,39 (-7,10)	-2,84 (-7,90)
ΔH_{max} , м	9,42 (7,63)	8,96 (8,06)	6,98 (7,06)

ных ЦМР (табл. 2–4) с аналогичными оценками, приведенными в таблице 5, показывает, что процедура осреднения повышает точность высот ЦМР всего на 15–20% вследствие взаимной корреляционной зависимости между ошибками высот радарных ЦМР, полученных в разных парах, содержащих снимки с одинаковыми номерами. В качестве примера на рис. 3, 4 приведены графики корреляционной зависимости ошибок между независимыми парами 03–07 — 06–08 и парами 06–08 — 06–09, содержащими одинаковый снимок 06.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОСРЕДНЕННЫХ ЦМР ОТНОСИТЕЛЬНО МОДЕЛИ SRTM ПО КОНТРОЛЬНЫМ ТОЧКАМ

Строго говоря, любые радарные ЦМР не являются цифровыми моделями топографического рельефа Земли (за исключением совершенно открытой местности без растительности и строений), так как

отражения радиолокационного сигнала происходят от крон древесной и кустарниковой растительности, крыш зданий и строений и других объектов, находящихся на земной поверхности.

С этой точки зрения более корректно оценивать точность радарных ЦМР относительно модели SRTM, которая также построена по данным радарной интерферометрической съемки.

В табл. 6 приведены показатели точности высот осредненных ЦМР относительно модели SRTM, вычисленные по разностям высот моделей в контрольных точках.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОШИБОК ВЫСОТ ОСРЕДНЕННЫХ ЦМР ОТНОСИТЕЛЬНО МОДЕЛИ SRTM

Пространственное распределение ошибок высот осредненных радарных ЦМР (без входной ЦМР) относительно модели SRTM на исследуемом участ-

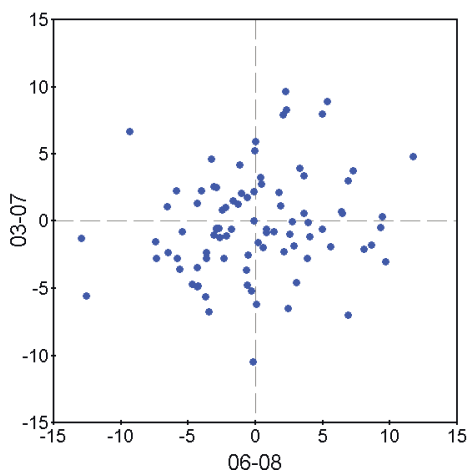


Рис. 3. График корреляционной зависимости ошибок между независимыми парами снимков 03-07 – 06-08

ке для двух алгоритмов осреднения приведено на рис. 5. Ошибки высот ЦМР рассчитывались в узлах сетки 50×50 м. Водная поверхность р. Камы и Камского водохранилища выделена черным цветом.

Визуальный анализ рис. 5 наглядно показывает преимущество медианного осреднения высот по сравнению со среднеарифметическим осреднением при наличии резко выделяющихся отрицательных ошибок в местах разрыва фазы. Численные результаты, приведенные в таблице 7, подтверждают этот вывод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных экспериментальных исследований точности построения ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных снимков ALOS/PALSAR можно сделать следующие выводы:

- Для построения ЦМР в районах, где нет достоверной информации о рельефе местности, желательно подбирать пары снимков, для которых значения разности высот $\Delta H_{2\pi}$, соответствующие изменению фазы на 2π , близки к перепаду высот местности на выбранной территории. В этом случае обработку снимков можно вы-

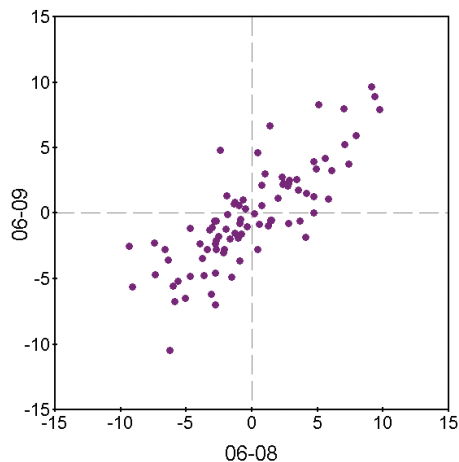


Рис. 4. График корреляционной зависимости ошибок между парами снимков 06-08 – 06-09, содержащими одинаковый снимок 06

полнять без входной ЦМР.

- Величина временного базиса между снимками пары ΔD практически не влияет на точность построения радарной ЦМР (в интервале времени 46 – 368 дней).
- Для повышения точности ЦМР можно выполнить осреднение высот, полученных в разных парах. При этом по возможности следует подбирать пары, в которые не входят снимки с одинаковыми номерами.
- Из двух наиболее простых алгоритмов осреднения высот ЦМР в узлах сетки (среднее арифметическое и медиана) последний алгоритм дает более устойчивые значения оценок высот, так как он менее чувствителен к резко выделяющимся данным.
- Точность высот ЦМР, построенных по снимкам ALOS/PALSAR, для выбранной для исследования территории с достаточно разнообразным характером рельефа и отражающей поверхности характеризуется средними квадратическими ошибками: по одной паре снимков — 5–6 м, по хорошо подобранным и осредненным 5 парам снимков — 3–4 м. Приведенные оценки справедливы для территорий, где процедура развертывания фазы прошла успешно.

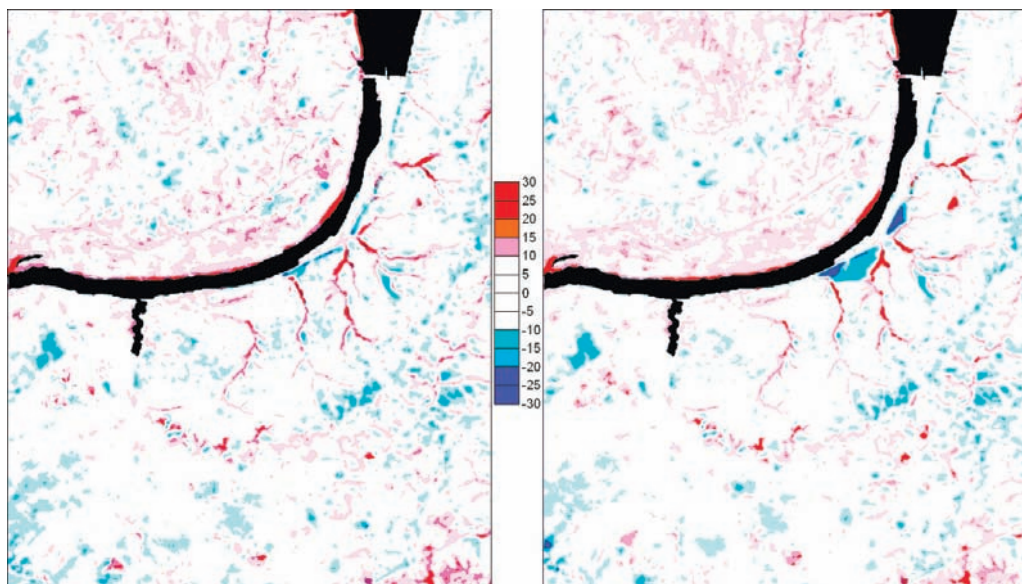


Рис. 5. Отклонения высот осредненных радарных ЦМР (без входной ЦМР) от модели рельефа SRTM. Алгоритмы осреднения: а – медиана, б – среднее арифметическое

Таблица 7

Процент площади исследуемой территории, на которой ошибки высот осредненных ЦМР (без входной ЦМР) лежат вне заданного интервала высот

Интервал высот, м	Алгоритм осреднения	
	Среднее арифметическое	Медиана
-5 – 5	11,2	11,6
-10 – 10	3,7	3,2
-15 – 15	1,2	0,7
-20 – 20	0,6	0,2
-25 – 25	0,3	0,1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Болсуновский М. А. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS/PALSAR // Геоматика. – 2008. №1. С. 37–45.
2. Кантемиров Ю.И. Обзор основных методик обработки радарных данных ДЗЗ и их реализация в программном комплексе SARscape // Геоматика. – 2012. №1. С. 30–43.
3. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М: Наука. 1973. – 900 с.