

Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли

П.Е. Шимкин¹, М.И. Бабокин², А.И. Баскаков¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия*

E-mails: shimkinpy@gmail.com, BaskakovAI@mpei.ru

² *ЗАО «Аэрокон», Жуковский, 140180, Россия*

E-mail: m.baboki@hotmail.ru

Работа посвящена исследованию реальной точности измерения рельефа поверхности с помощью интерферометрического однопозиционного комплекса дистанционного зондирования Земли на примере авиационного радиолокатора с синтезируемой апертурой антенны (РСА). Рассматриваемый в работе интерферометрический РСА (ИРСА) позволяет производить оперативную оценку рельефа подстилающей поверхности за один проход носителя РСА без необходимости во второй приемной антенне РСА. Описывается алгоритмическая реализация интерферометрической обработки сигналов, проверка и отладка которой осуществляются по реальным радиолограммам, записанным на борту авиационного носителя в ходе испытательных полетов. Особенностью интерферометрической обработки при таком построении ИРСА является возможность использования одного увеличенного интервала синтезирования с разбиением на подынтервалы для организации интерферометрических измерений. Благодаря такому подходу появляется возможность варьирования базы интерферометра на этапе цифровой обработки сигналов. Это позволяет исследованием коэффициента корреляции пары комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) извлечь информацию о точности измерений рельефа местности в зависимости от размера базы интерферометра и выбрать его оптимальный размер, при котором погрешность оценки рельефа минимальна. Дается визуальное сравнение полученных трехмерных изображений местности с данными из Google Earth. Продемонстрирована возможность использования предлагаемой схемы построения однопроходного бортового ИРСА при решении задач получения цифровых моделей рельефа.

Ключевые слова: однопроходный РСА интерферометр, коэффициент корреляции, цифровая модель рельефа, трехмерное изображение

Одобрена к печати: 01.06.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112

Введение

Среди известных методов зондирования интерферометрическим радиолокатором с синтезируемой апертурой антенны (ИРСА), позволяющих повысить информативность средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) решением задачи получения детальных трехмерных изображений рельефа местности, одной из перспективных схем построения интерферометра является однопроходный ИРСА переднебокового обзора. Такой ИРСА обладает серьезными преимуществами, а именно: оперативным получением информации за один проход носителя РСА, отсутствием необходимости во второй приемной антенне или в повторном пролете над исследуемым участком местности, кроме того, возможностью организации разных размеров базы интерферометра при необходимости раскрытия фазовой неоднозначности. На сегодняшний день данному типу ИРСА посвящен ряд работ, в которые входят статьи по экспериментальной отработке алгоритмов измерения рельефа (Бабокин и др., 2014; Бабокин, Толстов, 2016; Шимкин, Баскаков, Бабокин, 2016), исследовательские работы (Баскаков, Шимкин, 2013, 2015), демонстрирующие высокий потенциал по точностным характеристикам, а также статья по моделированию (Шимкин, 2016), которые совместно подтверждают возможность использования предлагаемой схемы однопроходного ИРСА переднебокового обзора в задачах измерения и получения цифровых моделей рельефа подстилающей

поверхности Земли. Данная работа посвящена определению реальной точности измерения рельефа поверхности таким типом ИРСА исследованием коэффициента корреляции пар радиолокационных изображений (РЛИ).

Описание эксперимента и объекты наблюдений

Схема построения однопроходного переднебокового ИРСА отличается от общеизвестных тем, что база интерферометра организуется естественным перемещением носителя РСА в пространстве, а повторное наблюдение одного и того же участка поверхности — выбором телескопического способа зондирования. Принцип его работы на примере одиночной точечной цели, имеющей координаты (x_i, y_i, z_i) поясняет *рис. 1*, на котором изображена геометрия визирования интерферометра.

Первый сеанс наблюдения за поверхностью происходит на дальности R_1 , угле отклонения по азимуту α_1 , угле места θ_1 . После естественного перемещения носителя РСА на расстояние базы интерферометра B происходит второй сеанс наблюдения за той же областью поверхности на дальности R_2 , азимуте α_2 , угле места θ_2 . Повторные сеансы осуществляются при постоянных высоте полета носителя H и скорости V на интервалах синтезирования апертуры L .

Следует отметить, что в экспериментальных условиях двойной интервал синтезирования не формировался, а использовался один большой интервал синтезирования с разбиением на подынтервалы на этапе цифровой обработки сигналов.

Согласно *рис. 1* и принятому допущению о наличии всего одного интервала синтезирования, на борту авиационного носителя РСА в ходе испытательных полетов были записаны реальные радиоголограммы, содержащие в себе информацию о радиолокационной съемке таких объектов, как район горы Большое Богдо (Астраханская область) и район Волжской гидроэлектростанции (ГЭС). Исходные параметры наблюдения для каждого из объектов приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Параметры наблюдения

Параметр	Район наблюдения	
	Большое Богдо	Волжская ГЭС
Дальность до центра кадра R_1 , км	60	40
Высота полета носителя H , км	5	8
Скорость полета носителя V , м/с	150	200
Отклонение луча по азимуту α_1 , град	40	30
Рабочая длина волны λ , см	3	3
Период повторения $T_{\text{п}}$, мс	1	1
Длина интервала синтезирования L , м	255	340
Разрешающая способность по горизонтальной дальности Δu , м	15,05	15,3
Разрешающая способность по азимуту Δx , м	4,98	3,19

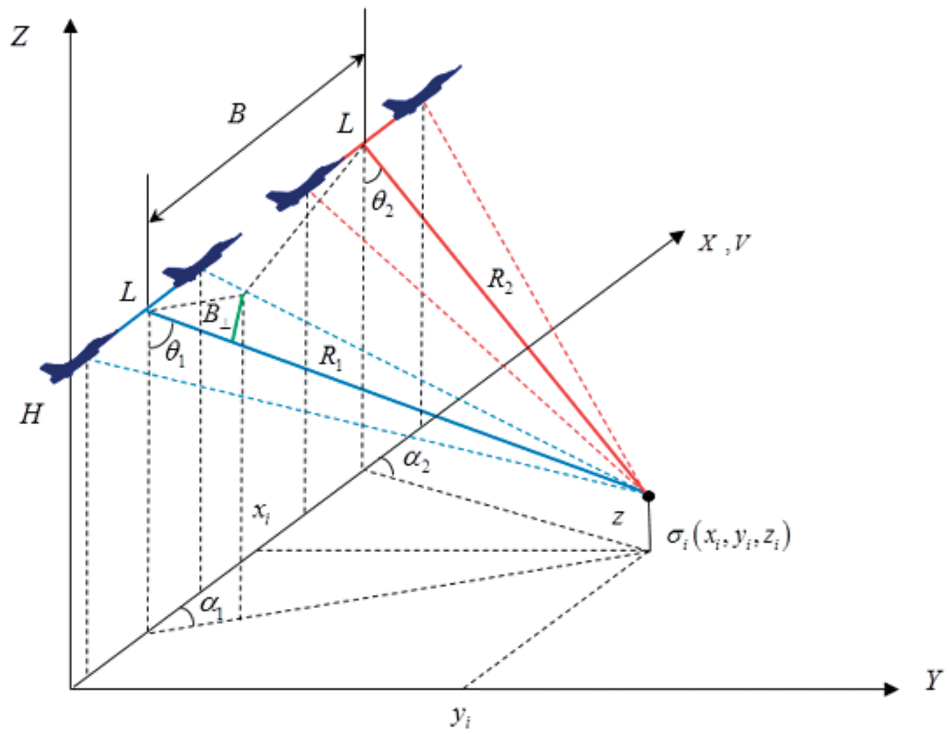


Рис. 1. Геометрия визирования однопроходного переднебокового ИРСА

Структура цифровой обработки радиоголограммы

В общем виде структуру интерферометрической цифровой обработки радиоголограммы авиационного РСА можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рис. 2.

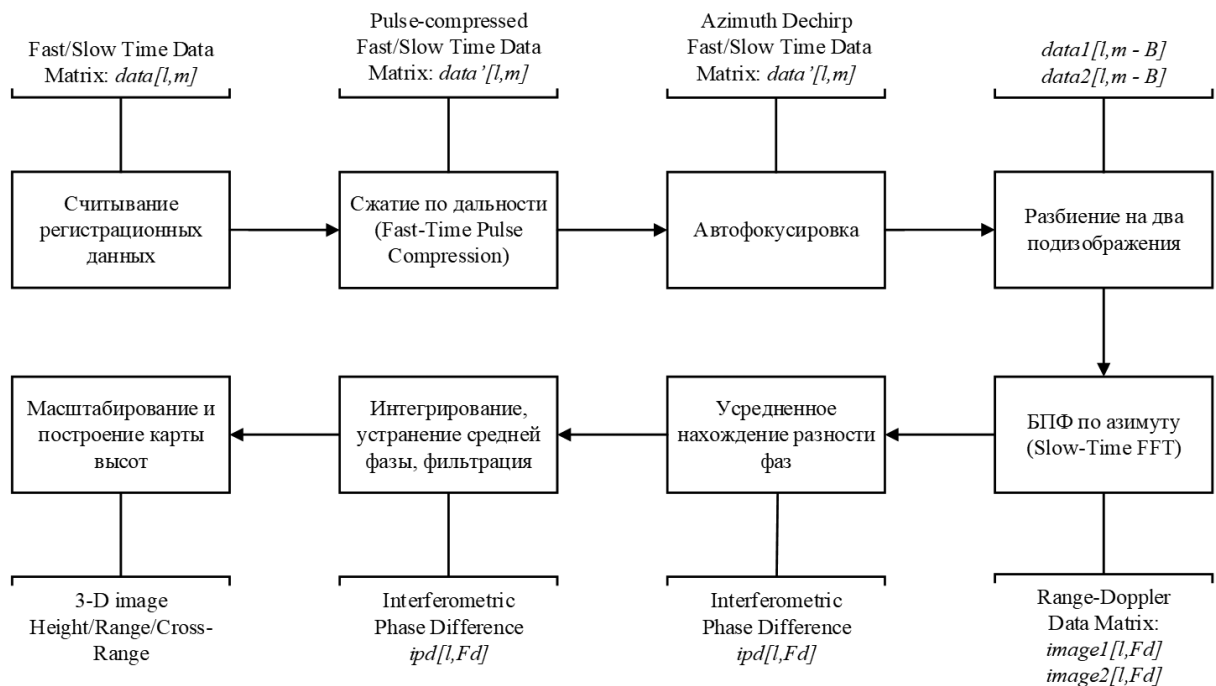


Рис. 2. Блок-схема цифровой обработки радиоголограммы

Регистрационные данные открываются, и считываются радиоголограммы специального формата, в результате чего образуется массив данных траекторного сигнала $data(l, m)$ размером $l \times m$, где l — номер строка (элемента) по дальности, другими словами, индекс по наклонной дальности, а m — номер периода повторения, индекс по азимуту. Для имеющихся радиоголограмм $l = 524$, $m = 1700$. После этого исходный траекторный сигнал подвергается операции согласованной фильтрации (сжатия) по каждой строке дальности, где в качестве опорного сигнала участвует копия зондирующего фазоманипулированного сигнала, код Баркера — 13. Затем применяется стандартный фазоразностный алгоритм автофокусировки (Melvin, Sheer, 2013), который, кроме устранения квадратичных фазовых искажений РЛИ, позволяет устранить и квадратичный фазовый набег, вызванный линейно-частотной модуляцией вдоль координаты азимута. После этого по выбранному размеру базы интерферометра B_S искусственно формируются два траекторных сигнала $data_1(l, m - B_S)$ и $data_2(l, m - B_S)$. Следует отметить, что при таком разбиении на два подизображения максимальный индекс по азимуту теперь меньше на величину базы интерферометра, выраженной в отсчетах периода повторения, что эквивалентно уменьшению длины исходной синтезируемой апертуры L до величины $L_{12} = L - B$ для каждого из пары РЛИ, где B — размер базы интерферометра, пересчитанный в метры. Пропорционально уменьшению интервалов синтеза ухудшается и разрешающая способность по азимуту для каждого из изображений в L/L_{12} раз. Далее применяется второй этап двумерной обработки радиоголограммы, заключающийся в узкополосной доплеровской фильтрации, которая, в частности, реализуется применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) по каждой азимутальной строке. С целью уменьшения влияния интегрального уровня боковых лепестков перед применением БПФ производится взвешивание по каждой азимутальной строке окном Blackman-Harris:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{m - B_S - 1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{m - B_S - 1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{m - B_S - 1}\right), \quad (1)$$

$$a_0 = 0,35875, a_1 = 0,48829, a_3 = 0,01168, 0 \leq n \leq (m - B_S - 1).$$

В результате такой обработки формируются два комплексных РЛИ: $image_1(l, f_d)$ и $image_2(l, f_d)$, где f_d означает, что изображения по координате азимута находятся в пространстве доплеровских частот. Наличие пары РЛИ позволяет перейти к интерферометрической обработке, но перед этим изображения необходимо привести к «единому моменту времени» компенсацией линейного фазового набега по азимуту:

$$image_2(l, f_d) = image_2(l, f_d) \cdot \exp\left(\frac{i2\pi B_S}{m}\right). \quad (2)$$

После этого происходит усредненное комплексное сопряжение:

$$I(l, f_d) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \left[image_1(l+i, f_d+j) \cdot image_2^*(l+i, f_d+j) \right] \quad (3)$$

и нахождение разности фаз, в результате чего образуется массив интерферометрической разности фаз (ИРФ):

$$\hat{\phi}(l, f_d) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[I(l, f_d)]}{\text{Re}[I(l, f_d)]} \right\}, \quad (4)$$

где M, K — размеры усреднения по координатам горизонтальной дальности и азимута.

Необходимо отметить факт, что ценой уменьшения фазовых ошибок становится ухудшение разрешения как по дальности, так и по азимуту, соответственно в M и K раз.

Затем полученный массив ИРФ интегрируется по азимуту для перевода ИРФ во временную область, происходит устранение средней фазы и фильтрация с целью сглаживания ИРФ. Окончательным этапом служит масштабирование с целью привязки изображения к локальным координатам азимут/горизонтальная дальность/высота (x, y, z) :

$$f_d \rightarrow x = \frac{\lambda R_1}{2V \sin \alpha_1} f_d; \quad l \rightarrow y = \frac{R_1 + cT_s l/2}{\sin \theta_1}; \quad \hat{\phi} \rightarrow z = \frac{\lambda H \tan \theta_1}{4\pi B \cos \alpha_1 \cdot \cos \theta_1} \hat{\phi}, \quad (5)$$

где $B = B_s T_\Pi V$ — база интерферометра, выраженная в метрах; T_s — период дискретизации сигналов.

Исследование коэффициента корреляции

Для исследования коэффициента корреляции варьируем размер базы интерферометра и оцениваем модуль коэффициента корреляции методом максимального правдоподобия (Bamler, Hartl, 1998):

$$|\hat{\gamma}(B_S)| = \frac{\left\langle \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K [image_1(l+i, f_d(B_S)+j) \cdot image_2^*(l+i, f_d(B_S)+j)] \right|^2 \right\rangle}{\sqrt{\left\langle \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K [image_1(l+i, f_d(B_S)+j)] \right|^2 \right\rangle \cdot \left\langle \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K [image_2(l+i, f_d(B_S)+j)] \right|^2 \right\rangle}}. \quad (6)$$

Теоретически, коэффициент корреляции для такого типа ИРСА состоит из четырех составляющих (Баскаков, Шимкин, 2015): $\gamma = \gamma_{noise} \gamma_{rotation} \gamma_{spatial} \gamma_{surface}$, где γ_{noise} — декорреляция за счет теплового шума РСА; $\gamma_{rotation}$ — из-за взаимного разворота пары изображений; $\gamma_{spatial}$ — за счет пространственного разнесения антенны в разные моменты времени; $\gamma_{surface}$ — вследствие шероховатости поверхности. Для правильной оценки выражения (6) необходимо учесть факт, что коэффициент корреляции рассчитывается по паре изображений, которые подверглись операции гармонического анализа применением БПФ, которое, как известно, увеличивает отношение сигнал/шум (SNR). Это, в свою очередь, приведет к увеличению значения шумового компонента γ_{noise} в $(1+SNR)/(m-B_S)^{-1}+SNR$ раз и увеличению оценки (6) в целом. Кроме того, следует учесть потери в SNR за счет применения весового окна:

$$SNR_{loss} = \frac{\left| \sum_{n=0}^{m-B_S-1} w(n) \right|^2}{(m-B_S-1) \sum_{n=0}^{m-B_S-1} |w(n)|^2}.$$

Поэтому оцененный модуль коэффициента корреляции (6) необходимо скорректировать согласно выражению: SNR

$$|\hat{\gamma}_c(B_S)| = |\hat{\gamma}(B_S)| \cdot \frac{(m-B_S)^{-1} + SNR - SNR_{loss}}{1 + SNR - SNR_{loss}}. \quad (7)$$

Рассчитанная по формуле (7) зависимость среднего по кадру РЛИ коэффициента корреляции от базы интерферометра, выраженной в метрах, при $SNR \approx 10$ дБ и $M = K = 3$ изображена на рис. 3.

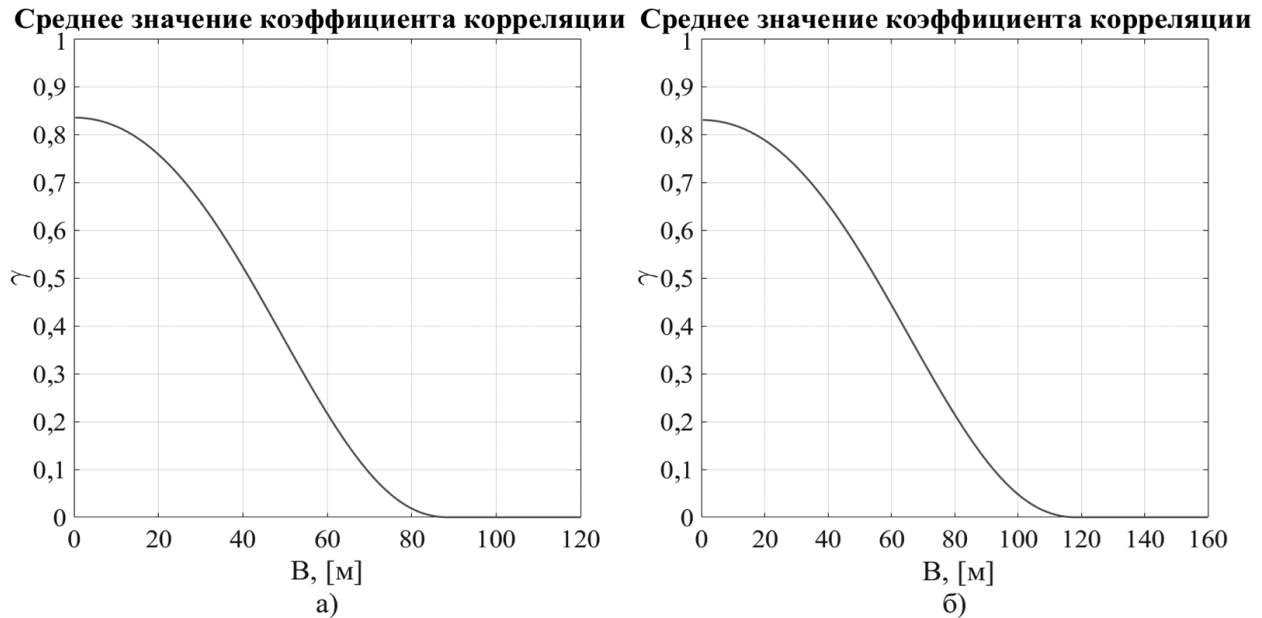


Рис. 3. Зависимость среднего значения коэффициента корреляции от базы интерферометра: а) — Большое Богдо; б) — Волжская ГЭС

Исследование точности измерений

Среднеквадратическое отклонение (СКО) ИРФ $\sigma_{\hat{\gamma}}$ в зависимости от размера базы интерферометра B можно оценить с помощью неравенства Крамера-Рао, которое дает нижнюю границу дисперсии оценки коэффициента корреляции (Bamler, Hartl, 1998):

$$\sigma_{\hat{\gamma}}^2 = \frac{\left[1 - |\hat{\gamma}(B)|^2 \right]^2}{2MK}$$

и соответственно оценки ИРФ (Rodriguez, Martin, 1992):

$$\sigma_{\hat{\phi}}^2(B) = \frac{1 - |\hat{\gamma}(B)|^2}{2MK|\hat{\gamma}(B)|^2}.$$

В свою очередь, СКО оценки рельефа связана с СКО оценки ИРФ и определяется с помощью уравнения (Баскаков, Шимкин, 2015):

$$\sigma_{z\hat{\phi}}(B) = \left| \frac{\lambda H \tan \theta_1}{4\pi B \cos \alpha_1 \cos \theta_1} \right| \sigma_{\hat{\phi}}(B). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что на этапе цифровой обработки сигналов имеется возможность исследовать $\sigma_{z\hat{\phi}}(B)$ и выбрать наиболее выгодный режим интерферометрического зондирования, при котором погрешность оценки рельефа минимальна. Результаты расчета СКО оценки рельефа приведены на *рис. 4*, а характерные значения сведены в *табл. 2*. Также в *табл. 2* внесена информация о разрешающих способностях с учетом разбиения и усреднения.

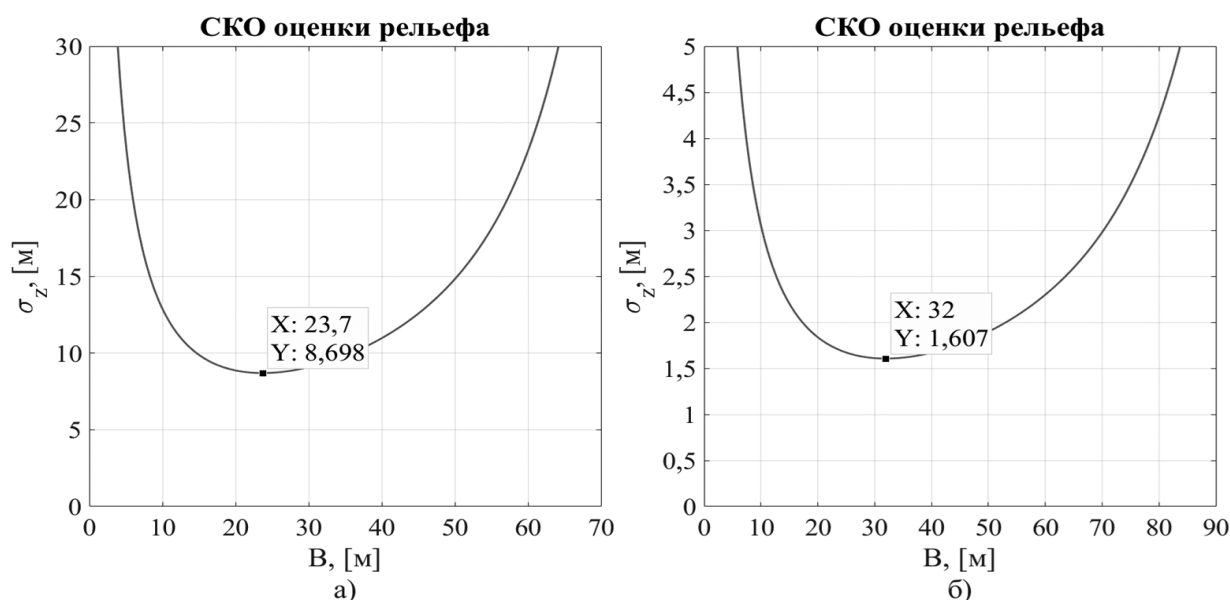


Рис. 4. Зависимость СКО оценки рельефа от базы интерферометра: а) — Большое Богдо; б) — Волжская ГЭС

Таблица 2. Точностные параметры

Параметр	Район наблюдения	
	Большое Богдо	Волжская ГЭС
Оптимальный размер базы B_s , отсчеты T_{II}	156	160
Оптимальный размер базы B , м	23,7	32
Ортогональная проекция базы B_{\perp} , м	1,5	5,5
СКО оценки рельефа $\sigma_{z\hat{\phi}}$, м	8,7	1,6
Интервал синтезирования L_{12} , м	231,3	308
Разрешение по горизонтальной дальности Δy_{12} , м	45,15	45,9
Разрешение по азимуту Δx_{12} , м	16,47	10,59

Сравнение с достоверными данными

Результаты последнего этапа обработки и наглядное сравнение с данными из Google Earth приведены на *рис. 5, 6*. При сравнении были выбраны оптимальные размеры базы интерферометра согласно *табл. 2*.

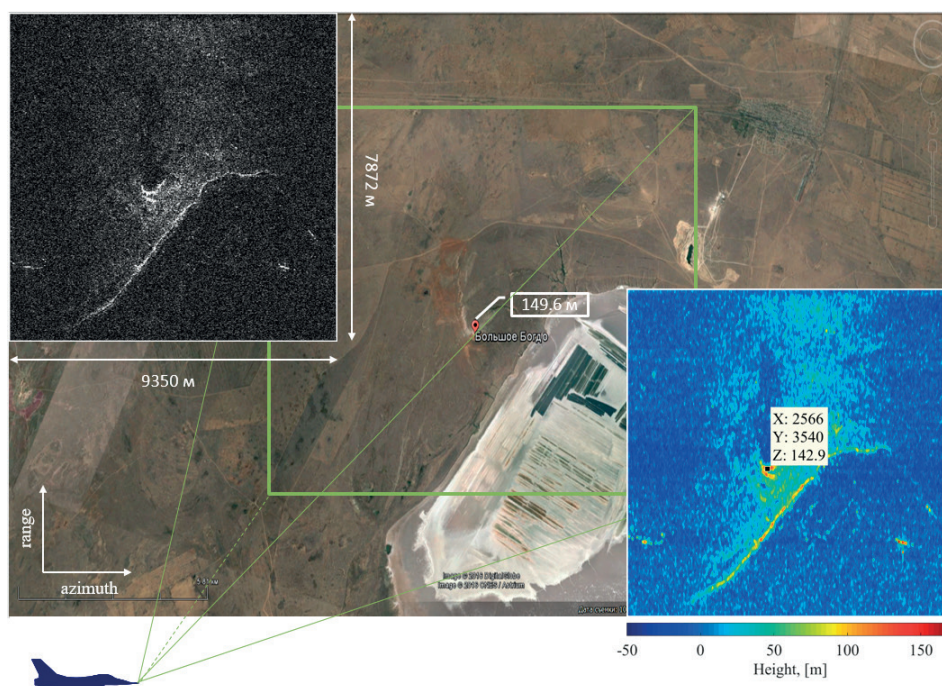


Рис. 5. Сравнение с данными из Google Earth (амплитудное РЛИ, трехмерное изображение из Google Earth, полученная ЦМР района горы Большое Богдо)

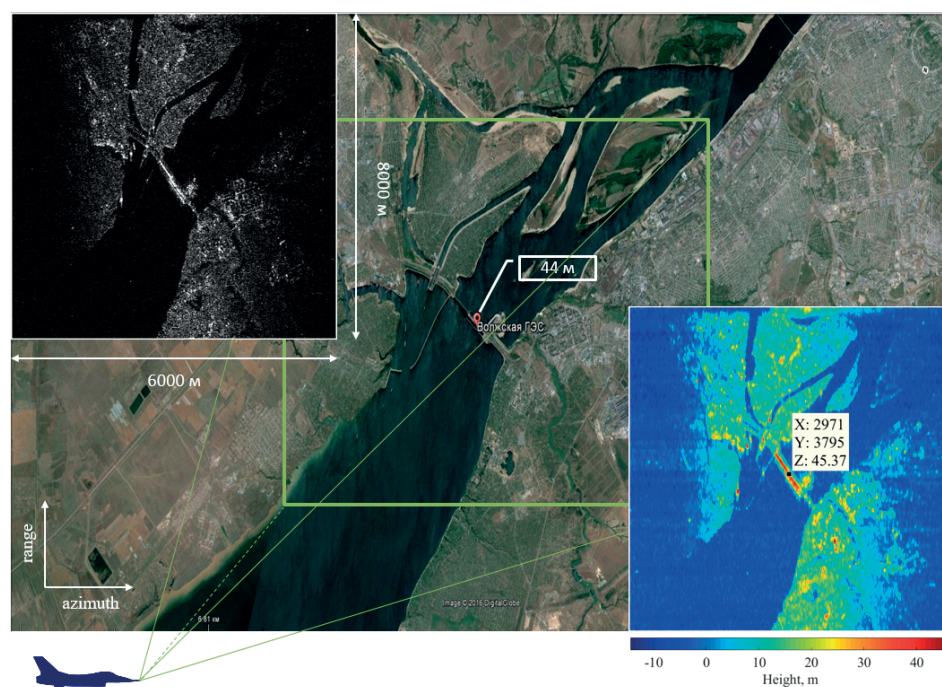


Рис. 6. Сравнение с данными из Google Earth (амплитудное РЛИ, трехмерное изображение из Google Earth, полученная ЦМР района Волжской ГЭС)

Выводы

Экспериментальная обработка алгоритмов однопроходного переднебокового ИРСА показала возможность его использования в качестве инструмента оперативного измерения рельефа подстилающей поверхности. Поведение коэффициента корреляции в зависимости от размера базы интерферометра является ожидаемым, а рассчитанная с помощью него точность оценки рельефа близка по порядку к потенциальной. В целом результаты обработки алгоритмов оценивания рельефа дают близкое совпадение измерений характерных точек рельефа местности предложенным способом организации интерферометрической съемки с достоверными топографическими данными. Отличия в реальной точности оценки рельефа при радиолокационной съемке рассмотренных объектов объясняются существенным различием в геометрии наблюдения.

Перспективой дальнейшего исследования служит подробное изучение поведения знакопеременного скачка интерферометрической разности фаз для объектов с резко изменяющейся отражающей способностью в соседних элементах разрешения, который приводит к ошибочному распознаванию объекта как высотного, что можно заметить на примере береговой линии соленого озера Баскунчак вблизи района горы Большое Богдо.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания в сфере научной деятельности в проектной части № 8.3244.2017 ПЧ.

Литература

1. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П.* Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. № 7. С. 16–20.
2. *Бабокин М.И., Толстов Е.Ф.* Фазовое портретирование в многоканальных РСА // 6-е Всероссийские Армандовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред»: материалы 7-й Всерос. науч. конф. Муром, 31 мая – 2 июня 2016. Муром: Полиграф. центр МИ ВлГУ, 2016. С. 287–297.
3. *Баскаков А.И., Шимкин П.Е.* Исследование потенциальной точности определения местного рельефа авиационным интерферометрическим РСА при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2013. № 10. С. 71–74.
4. *Баскаков А.И., Шимкин П.Е.* Сравнение точностных характеристик двух способов построения авиационных интерферометрических РСА // Международ. науч. журн. «Альтернативная энергетика и экология». 2015. № 22. С. 77–83.
5. *Шимкин П.Е.* Имитационная модель однопроходного РСА интерферометра переднебокового обзора // Радиотехнич. и телекоммуникац. системы. 2016. № 4. С. 17–25.
6. *Шимкин П.Е., Баскаков А.И., Бабокин М.И.* Экспериментальная обработка алгоритмов оценивания рельефа с помощью однопроходного переднебокового РСА интерферометра // 6-е Всерос. Армандовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред»: материалы 7-й Всерос. науч. конф. Муром, 31 мая – 2 июня 2016. Муром: Полиграф. центр МИ ВлГУ, 2016. С. 244–250.
7. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. Vol. 14. No. 4. P. R1–R54.
8. *Melvin W.L., Sheer J.A.* Interferometric SAR and Coherent Exploitation // Principles of modern radar: advanced techniques / eds. Melvin W.L., Sheer J.A. SciTech Publishing. Edison, NJ, 2013. P. 337–398.
9. *Rodriguez E., Martin J.M.* Theory and design of interferometric synthetic aperture radars // IEE Proc. 1992. Vol. 139. No. 2. P. 147–159.

A study of accuracy of single-pass interferometric synthetic aperture radar with front-side view for measuring the Earth's surface

P.E. Shimkin¹, M.I. Babokin², A.I. Baskakov¹

¹National Research University MPEI, Moscow 111250, Russia

E-mails: shimkinpy@gmail.com, BaskakovAI@mpei.ru

²JSC Aerocon, Zhukovsky 140180, Russia

E-mail: m.baboki@hotmail.ru

This work is devoted to the study of real accuracy of surface topography measurement with the help of single-pass interferometric system of Earth Remote Sensing (ERS) by example of an airborne synthetic aperture radar (SAR). The interferometric SAR (InSAR), which is concerned in this work, allows operational evaluation of the terrain in one pass of the SAR carrier without employment of the second receiving antenna. Algorithmic implementation of interferometric signal processing is described, its verification and debugging are carried out by real SAR raw data, which are recorded onboard of an aircraft during test flights. The feature of interferometric processing in this InSAR design is the possibility to use one enlarged synthetic aperture interval splitted into subintervals for the organization of interferometric measurements. Due to this approach there is a possibility to vary the interferometer base during digital signal processing. It allows to obtain information on the accuracy of terrain measurements depending on interferometer base and choose an optimal baseline with minimum root-mean square error of the terrain by studying the correlation coefficient of a pair of single look complex (SLC) images. Visual comparison of the obtained terrain 3D-images with the data from Google Earth is performed. The applicability of the proposed single-pass InSAR design in obtaining digital terrain models is demonstrated.

Keywords: single-pass interferometric SAR, correlation coefficient, digital terrain model, three-dimensional image

Accepted: 01.06.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112

References

1. Babokin M.I., Efimov A.V., Karpov O.A., Titov M.P., Odnoprophodnyi interferometr pri perednebokovom obzore (Single-pass interferometer with anterolateral review), *Radiotekhnika*, 2014, No. 7, pp. 16–20.
2. Babokin M.I., Tolstov E.F., Fazovoe portretirovanie v mnogokanal'nykh RSA (Phase portraits in multi-channel SAR), *VI Vserossiiskie Armandovskie chteniya: Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred, Materialy VII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* (6th All-Russia Armands Readings, Proc. 7th All-Russia Science Conference), Murom, 31 May – 2 June 2016, Murom: Poligraficheskii tsentr MI VIGU, 2016, pp. 287–297.
3. Baskakov A.I., Shimkin P.E., Issledovanie potentsial'noi tochnosti opredeleniya mestnogo rel'efa aviatsionnym interferometricheskim RSA pri perednebokovom obzore (Potential accuracy of estimation of a local relief research by interferometric SAR aircraft in along track review), *Radiotekhnika*, 2013, No. 10, pp. 71–74.
4. Baskakov A.I., Shimkin P.E., Sravnenie tochnostnykh kharakteristik dvukh sposobov postroeniya aviatsionnykh interferometricheskikh RSA (Comparison of accuracy characteristics of the two ways to build aircraft interferometric SAR), *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2015, No. 22, pp. 77–83.
5. Shimkin P.E., Imitatsionnaya model' odnoprokhodnogo RSA interferometra perednebokovogo obzora (Simulation model for one-pass SAR interferometer of anterolateral survey), *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2016, No. 4, pp. 17–25.
6. Shimkin P.E., Baskakov A.I., Babokin M.I., Eksperimental'naya otrabotka algoritmov otsenivaniya rel'efa s pomoshch'yu odnoprokhodnogo perednebokovogo RSA interferometra (Experimental processing of the relief assessment algorithms by a single-passed interferometric SAR with front-side view), *VI Vserossiiskie Armandovskie chteniya: Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred* (6th All-Russia Armands Readings), *Materialy VII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 7th All-Russia Science Conference). Murom, 31 May – 2 June 2016, Murom: Poligraficheskii tsentr MI VIGU, 2016, pp. 244–250.
7. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54.
8. Melvin W.L., Sheer J.A., Interferometric SAR and Coherent Exploitation, *Principles of modern radar: advanced techniques*, SciTech Publishing, Edison, NJ, 2013, pp. 337–398.
9. Rodriguez E., Martin J.M., Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, *IEE Proceedings*, 1992, Vol. 139, No. 2, pp. 147–159.