

Экспериментальная обработка алгоритмов оценивания рельефа с помощью однопроходного переднебокового РСА интерферометра

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

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14

²АО «Корпорация «Фазотрон – НИИР», 123557, г. Москва, Электрический переулок 1, e-mail: shimkinpy@gmail.com, BaskakovAI@mpei.ru, m.baboki@hotmail.ru

Работа посвящена реализации алгоритмов интерферометрической обработки сигналов в пакете прикладных программ MATLAB и демонстрации работоспособности предлагаемой схемы построения однопроходного бортового РСА интерферометра в целях оценки подстилающего рельефа местности. Проверка и отладка осуществляются по реальным радиолограммам, записанным на борту авиационного носителя в ходе испытательных полетов. Проводится визуальное сравнение и анализ полученных трехмерных изображений местности с достоверными топографическими данными.

The work is dedicated to the implementation of algorithms for interferometric processing of signals in the application package MATLAB and demonstrate the efficiency of the proposed scheme of single-pass airborne SAR interferometer in order to assess the underlying terrain. Testing and debugging carried out by real Radioholograms recorded on board the aircraft carrier during the test flights. Held visual comparison and analysis of three-dimensional terrain images with accurate topographical data.

Введение

В последнее время, повышение информативности средств дистанционного зондирования Земли можно связать с развитием теории и техники радиолокационной интерферометрии. Она позволяет решать такие задачи как получение высокоточных топографических карт и цифровых моделей местности, определение сдвигов, уклонов земной поверхности, мониторинг приграничных территорий и др. Кроме того, немаловажным фактором является оперативность получаемой интерферометрической информации и последующее ее применение для решения вышеперечисленных задач. Если говорить о применении авиационных интерферометрических РСА (ИРСА) в качестве инструмента для определения и измерения рельефа местности, то, на сегодняшний день, одной из наиболее перспективных схем построения интерферометра является однопроходный интерферометрический однопозиционный РСА при переднебоковом обзоре [1, 2]. Помимо оперативности, простоты и гибкости, однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре имеет достаточно высокие точностные характеристики [3, 4].

Схема построения интерферометра

Предлагаемая схема построения однопроходного переднебокового интерферометра отличается от общеизвестных схем тем, что пространственное разнесение обеспечивается за счет естественного перемещения носителя РСА и стабилизации луча – которую можно обеспечить, выбрав телескопический способ зондирования. Рис. 1, на котором изображена геометрия организации интерферометра, поясняет принцип работы ИРСА на примере одиночной точечной цели, имеющей координаты (x_i, y_i, z_i) . При синтезе изображения эта цель сформирует элемент разрешения, имеющий

конечные размеры $\Delta x \times \Delta y$, где Δx – разрешающая способность по азимуту; Δy – разрешающая способность по горизонтальной дальности.

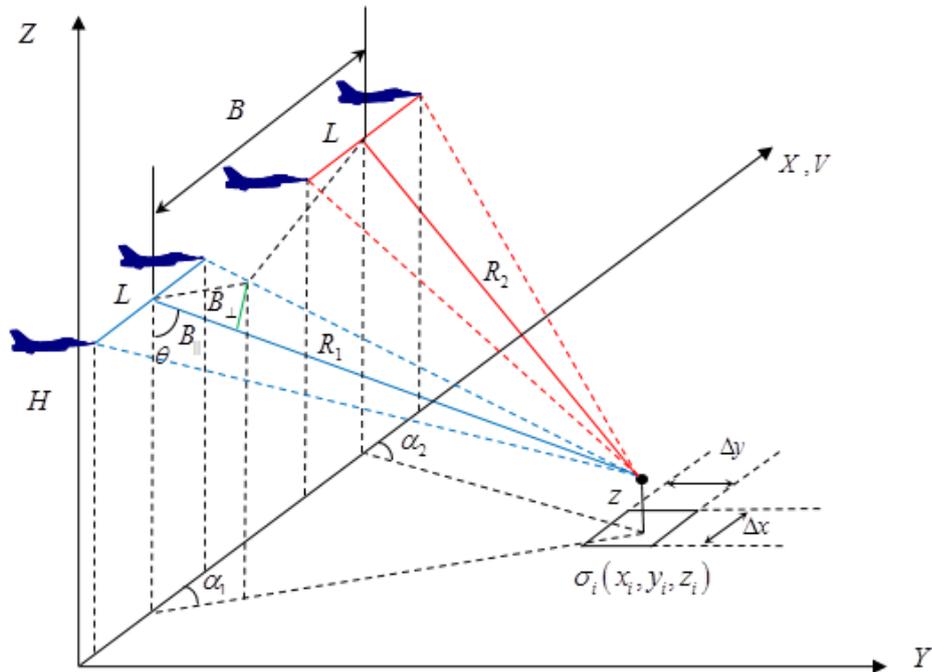


Рис. 1. Геометрия визирования переднебокового интерферометра

Принцип работы заключается в последовательном наблюдении за поверхностью на дальности R_1 , угле азимута α_1 в первом сеансе и R_2, α_2 – во втором, при постоянной высоте полета носителя H , угле места θ и постоянной скорости V (см. рис. 1), где L – размер синтезируемой апертуры. Второй сеанс наблюдения производится при перемещении носителя на расстояние базы интерферометра B .

Из рис. 1 возможность оценки высоты элемента разрешения появляется благодаря наличию перпендикулярной проекции B_{\perp} базы интерферометра B . Согласно этому же рисунку, соотношение для высоты элемента разрешения от параметров съемки и разности фаз ϕ определяется с помощью (1), или в более удобном и привычном виде с помощью (2) [3, 4]:

$$z = H - R_1 \sqrt{1 - \frac{\left(R_1^2 + B^2 - \left(R_1 - \frac{\lambda}{4\pi} \phi \right)^2 \right)^2}{2R_1 B \cos \alpha_1}}, \quad (1)$$

$$z = \frac{\lambda H \tan \theta}{4\pi B_{\perp}} \phi = \frac{\lambda H \tan \theta}{4\pi B \cos \alpha_1 \cos \theta} \phi. \quad (2)$$

В условиях эксперимента, двойной интервал синтезирования не формируется, а используется один интервал синтезирования с разбиением на подинтервалы на этапе цифровой обработки для организации интерферометра. Преимущества данного подхода состоят в следующем. Во-первых, это не требует специальных методов контроля наблюдения за поверхностью. Во-вторых, на этапе обработки появляется возможность гибкой перестройки размера базы интерферометра в целях раскрытия фазовой неоднозначности многобазовым методом. При этом, выражения (1) и (2) остаются неизменными.

Структура обработки радиоголограммы

В общем виде структуру интерферометрической обработки радиоголограммы авиационного РСА можно представить в виде блок-схемы (рис. 2).

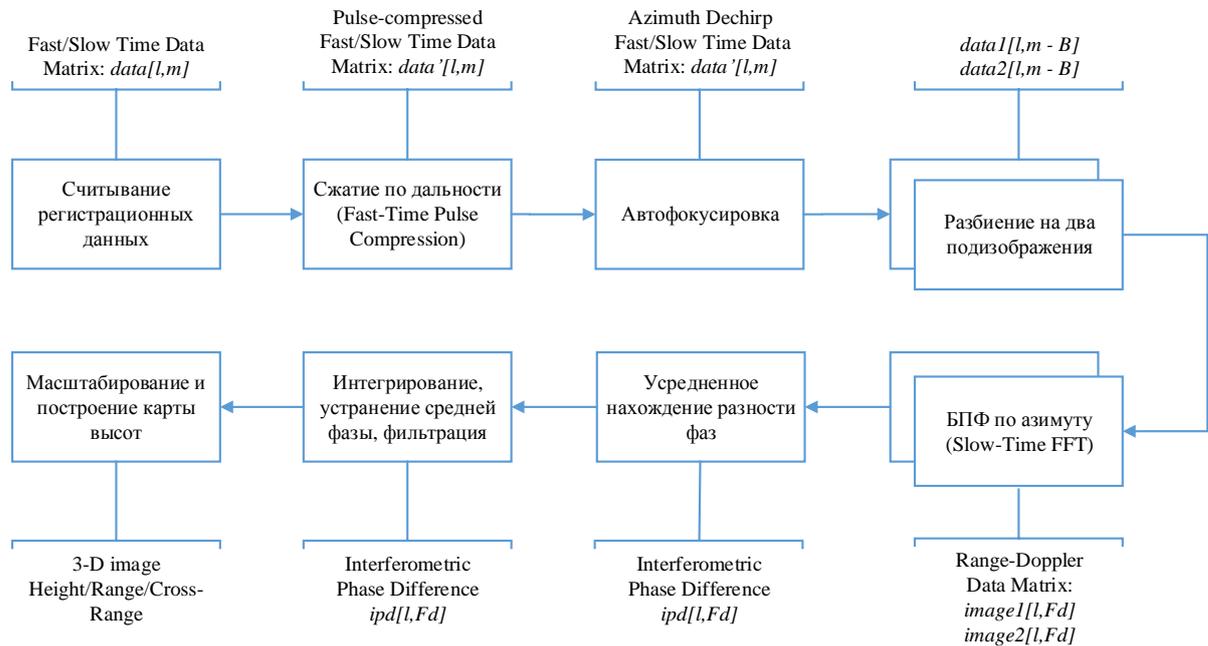


Рис. 2. Блок-схема обработки

Сначала происходит открытие регистрационных данных и считывание радиоголограммы специального формата, в результате чего образуется массив данных (траекторный сигнал) $data(l, m)$ размером $l \times m$, где l – номер строка (элемента) по дальности (индекс по наклонной дальности), m – номер периода повторения (индекс по азимуту). Затем, траекторный сигнал подвергается операции согласованной фильтрации (сжатия) по дальности, где в качестве опорного сигнала участвует зондирующий фазоманипулированный сигнал (код Баркера – 13). Затем применяется стандартный фазоразностный алгоритм автофокусировки [5], позволяющий произвести квадратичную фазовую коррекцию. После этого, по выбранному размеру базы B искусственно формируются два траекторных сигнала $data_1(l, m-B)$ и $data_2(l, m-B)$, где максимальный индекс по азимуту теперь меньше на величину базы сигнала, выраженной в отсчетах периодов повторения. Далее, т.к. разрешающая способность по дальности невелика и отсутствует эффект-миграции дальности, применяется простой алгоритм двумерной обработки, второй этап которого заключается в узкополосной доплеровской фильтрации, которая в частности, может быть реализована простым взятием быстрого преобразования Фурье (БПФ) по азимуту. 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 двух изображений позволяет перейти к разностно-фазовой обработке, но перед этим парные сигналы необходимо привести к «единому моменту времени» с помощью компенсации линейного фазового набега по азимуту (3):

$$image_2(l, f_d) = image_1 \cdot \exp \left[\frac{i2\pi B}{\max(m)} \right]. \quad (3)$$

После этого происходит усредненное комплексное сопряжение (4) и нахождение разности фаз по формуле (5), в результате чего образуется массив интерферометрической разности фаз (ИРФ):

$$I(l, f_d) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K [image_1(l+i, f_d+j) \cdot image_2^*(l+i, f_d+j)], \quad (4)$$

$$\hat{\phi}(l, f_d) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[I(l, f_d)]}{\text{Re}[I(l, f_d)]} \right\}, \quad (5)$$

где M, K – размеры усреднения в индексах наклонной дальности и азимута.

Далее происходит интегрирование ИРФ, необходимое для перевода ИРФ во временную область, устранение средней фазы и фильтрация с целью сглаживания ИРФ. Операция раскрытия фазовой неоднозначности не используется, т.к. по наблюдениям в экспериментальных отработках фазовые изменения в ИРФ не превосходят 2π – интервал. В перспективе, при необходимости раскрытия фазовой неоднозначности можно использовать многобазовый интерферометр, организовав несколько пар РЛИ с различной базой интерферометра.

Окончательным этапом служит масштабирование с целью привязки изображения к координатам азимут/горизонтальная дальность/высота (x, y, z) с помощью (6):

$$f_d \rightarrow x = \frac{\lambda R_0}{2V \sin \alpha} f_d; l \rightarrow y = (R_0 + cT_s l/2) / \sin \theta; \hat{\phi} \rightarrow z = \frac{\lambda H \tan \theta}{4\pi B \cos \alpha \cos \theta} \hat{\phi}, \quad (6)$$

где R_0 – начальная наклонная дальность до центра кадра;

T_s – период дискретизации сигналов.

Результаты экспериментальной отработки алгоритмов

Наиболее наглядной для представления этапов обработки служит нижняя ветка в блок-схеме на рис. 2, поэтому далее ей и ограничимся.

Один из экспериментов – обработка траекторного сигнала полученного в ходе испытательных полетов в районе Волжской ГЭС. На рис. 3 изображена пара амплитудных РЛИ, искусственно полученная из одной радиоголограммы вышеописанным способом. Параметры съемки и обработки будут показаны на конечном этапе.

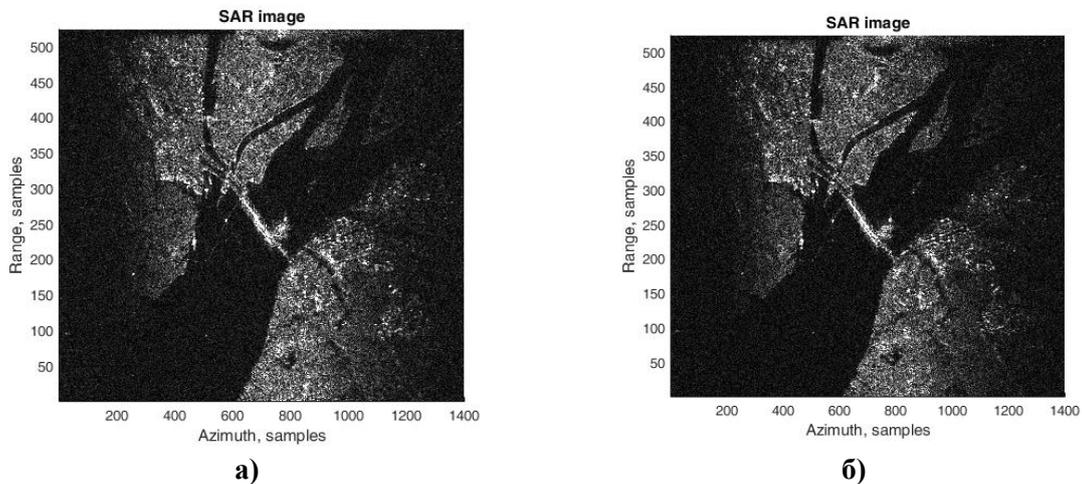


Рис. 3. Пара амплитудных РЛИ, район Волжской ГЭС

На рис.4. показан результат формирования ИРФ.

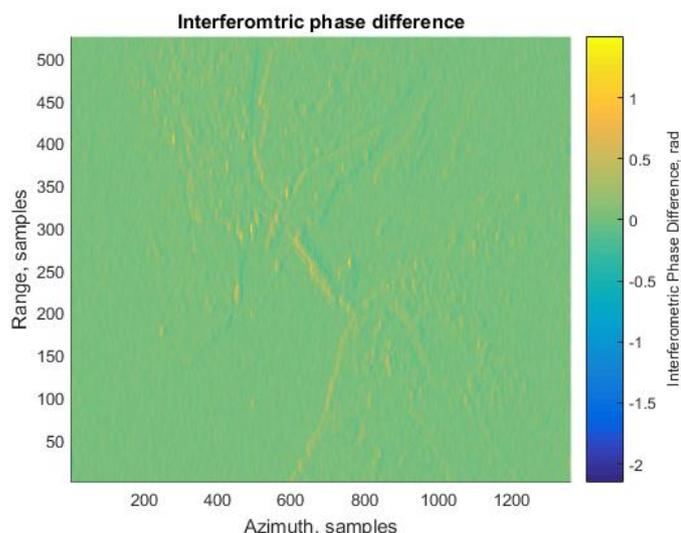


Рис. 4. Интерферометрическая разность фаз, размер базы $B = L/5$

Отсутствие характерной для интерферограмм полосовой структуры объясняется, во-первых, устранением линейного фазового набега на этапе приведения к «единому моменту времени» (без него появились бы полосы вдоль координаты азимута), во-вторых, тем, что телескопический обзор производился со стабилизацией зоны обзора с дискретом 2,5 м раз в 10 мс (без него проявилась бы полосатость ИРФ вдоль координаты дальность под углом, равному углу отклонения луча по азимуту).

На рис. 5 изображена последовательность (по часовой стрелке) предпоследнего этапа обработки.

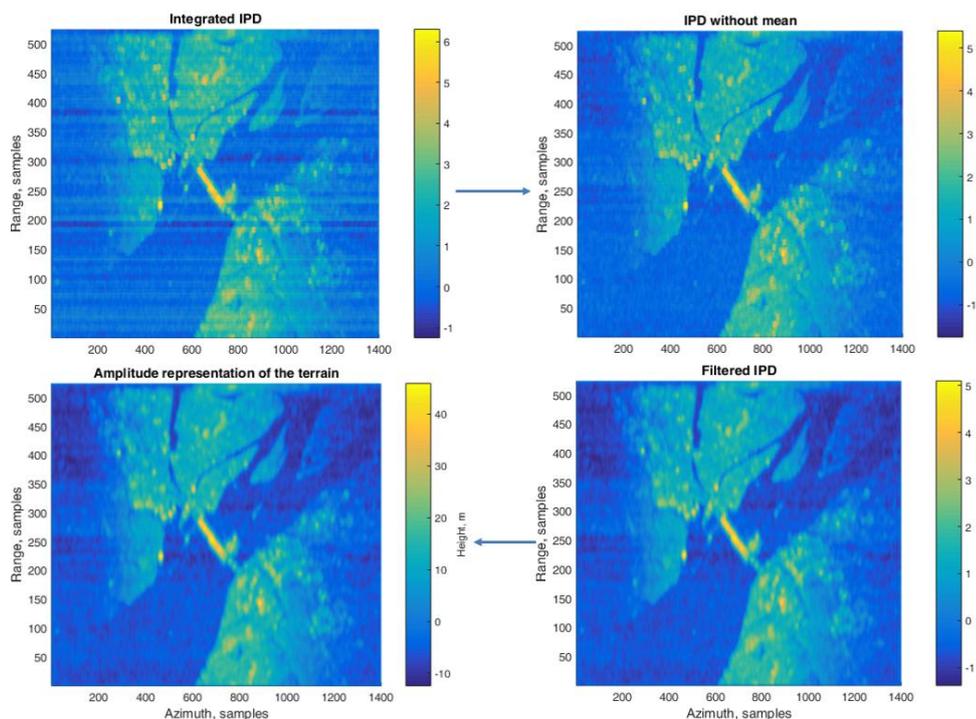


Рис. 5. Предпоследний этап обработки радиоголограммы

Результаты последнего этапа обработки и наглядное сравнение с данными из Google Maps приведены на рис. 6. Подробные параметры съемки и обработки: $R_0 = 40$ км, $H = 8$ км, $\alpha = 30^\circ$, $V = 200$ м/с, $T_{II} = 1$ мс, $l = 524$, $m = 1700 \rightarrow L = 340$ м, $B = L/5 \rightarrow B = 68$ м, $M = K = 10$.

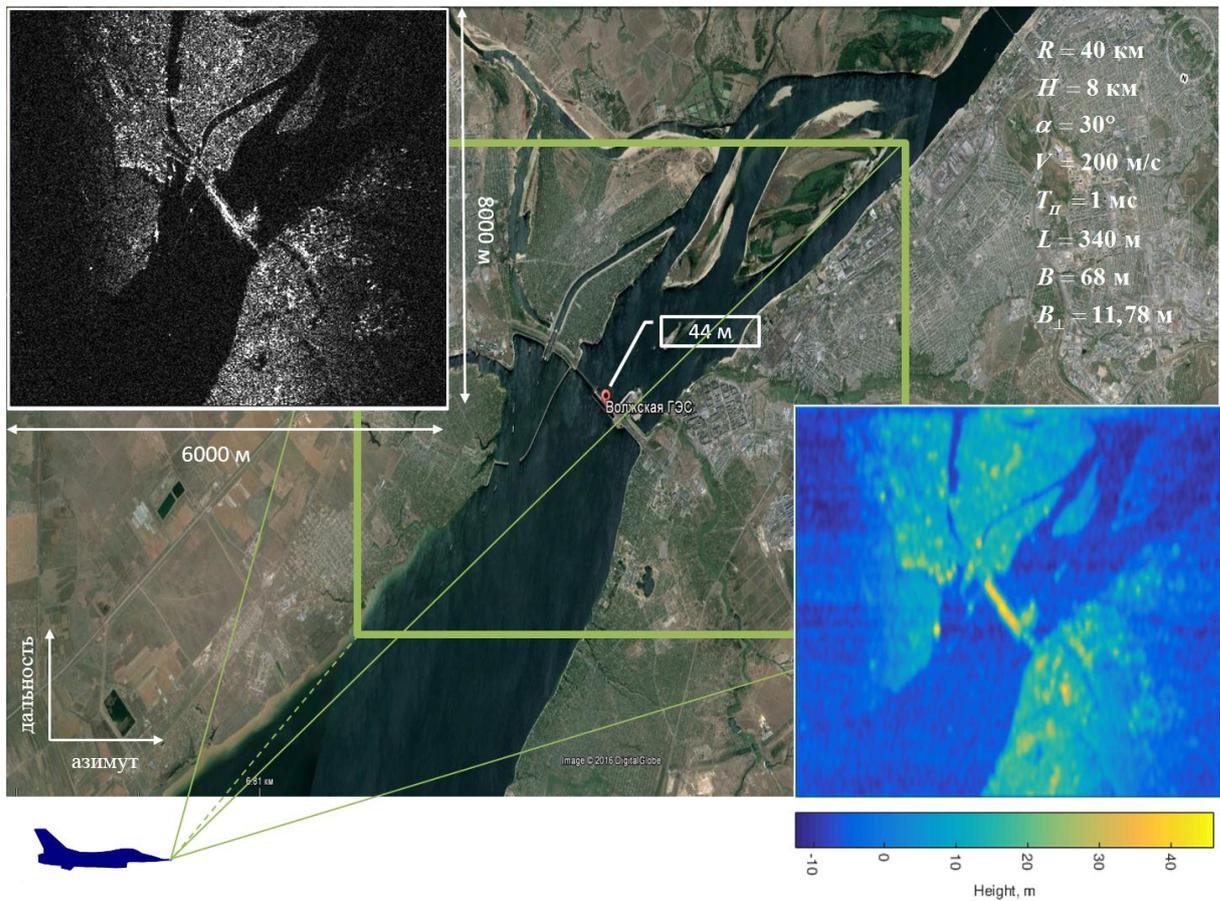


Рис. 6. Сравнение с данными из Google Maps (амплитудное РЛИ, топографические данные Google Maps, полученная цифровая карта высот района Волжской ГЭС)

Менее подробно рассматривается второй из экспериментов – обработка радиолокационных данных съемки района горы Большое Богдо (Астраханская область). Сравнение с данными Google Maps – рис. 7. Подробные параметры съемки и обработки:

$R_0 = 60$ км, $H = 5$ км, $\alpha = 40^\circ$, $V = 150$ м/с, $T_{II} = 1$ мс, $l = 524$, $m = 1700 \rightarrow L = 255$ м, $B = L/5 \rightarrow B = 51$ м, $M = K = 10$.

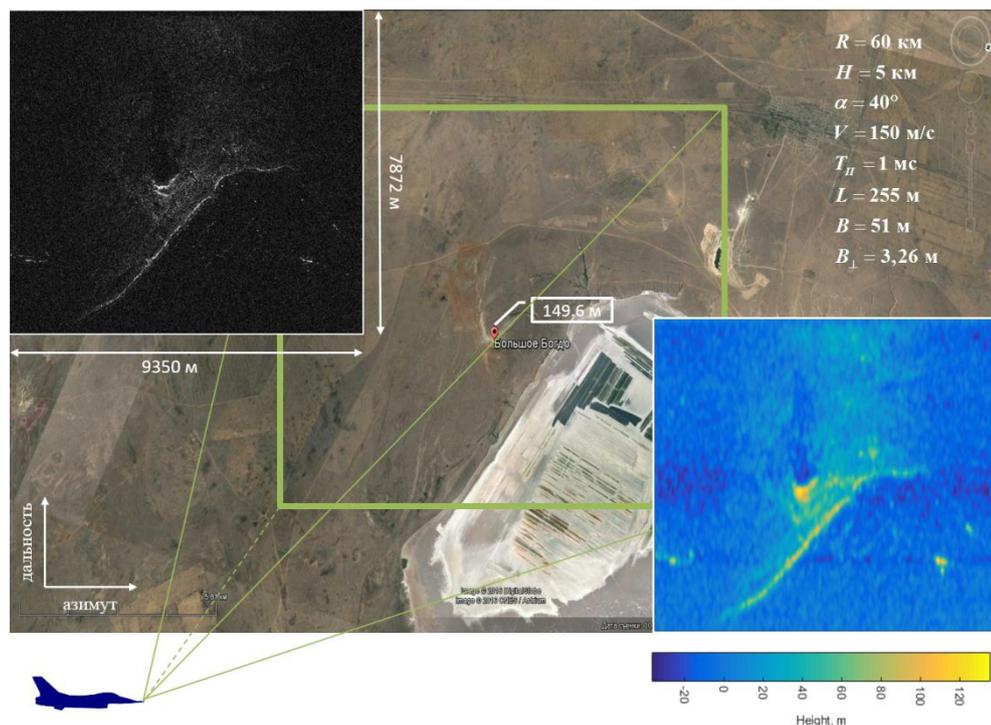


Рис. 7. Сравнение с данными из Google Maps (амплитудное РЛИ, топографические данные Google Maps, полученная цифровая карта высот района горы Большое Богдо)

Заключение

Экспериментальная обработка алгоритмов однопроходного переднебокового РСА интерферометра показала возможность его использования в качестве инструмента оперативного измерения рельефа подстилающей поверхности. Результаты обработки алгоритмов оценивания рельефа дают близкое совпадение измерений характерных точек рельефа местности предложенным способом организации интерферометрической съемки с достоверными топографическими данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-11-10022) и Государственного задания в сфере научной деятельности в проектной части № 8.152.2014/К

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. Авиационный переднебоковой РСА интерферометр для детальной оценки рельефа местности // Вопросы радиоэлектроники, серия РЛТ, №5, 2012
3. Баскаков А.И., Шимкин П.Е. Сравнение точностных характеристик двух способов построения авиационных интерферометрических РСА // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 22. С. 77–83.
4. Баскаков А.И., Шимкин П.Е. Исследование потенциальной точности определения местного рельефа авиационным интерферометрическим РСА при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2013. № 10. С. 71–74.
5. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Учебное пособие для вузов. / Под ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.