

# Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396.962: 528.835

## Оценка рельефа местности в РСА космического аппарата ряда «Кондор-Э»

### **Бабочкин Михаил Иванович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

*E-mail:* m.baboki@hotmail.ru.

### **Ефимов Александр Витальевич**

кандидат технических наук, ведущий конструктор ЗАО «АЭРОКОН».

*E-mail:* alexef@front.ru.

*Адрес:* 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д.1.

### **Костюк Евгений Александрович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник НЦ ОМЗ ОАО «РКС».

*E-mail:* ntsomz@ntsomz.ru.

*Адрес:* 127490, г. Москва, улица Декабристов, владение 51, строение 25.

### **Ракитин Алексей Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»

Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* alexey.rakitin@mail.ru.

*Адрес:* 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д.23.

*Аннотация:* В статье представлены алгоритмы и характеристики качества оценивания рельефа местности с использованием радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА). Рассмотрены специфика и разновидности интерферометрических измерений, а также возможности их применения в задачах радиолокационного мониторинга земной поверхности из космоса. Проведён детальный анализ бистатического и однопроходного интерферометра, состоящего из двух космических аппаратов (КА). Получены соотношения для расчёта текущей фазы и разности фаз траекторного сигнала, а также установлена взаимосвязь между значением высоты местного рельефа и разностью фаз. Приведены примеры расчёта среднеквадратической ошибки измерения местной высоты, показавшие влияние уклонов поверхности, отношения сигнал-шум и параметров съёмки на качество получения цифрового рельефа местности (ЦРМ). Особое внимание уделяется исследованию возможностей скошенного обзора, который реализуется с одним КА и часто возникает при радиолокационном космическом мониторинге. Приводятся результаты обработки голограмм, полученных РСА космического аппарата «Кондор-Э». Полученные радиолокационные оценки рельефа местности показывают высокую информативность и эффективность интерферометрической съёмки с использованием РСА субметрового разрешения.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, радиолокатор с синтезированием апертуры, интерферометр, рельеф местности, скошенный режим, радиоголограмма, радиолокационное изображение.

### **Введение**

Мониторинг Земли в интерферометрических режимах в настоящее время рассматривается как один из основных способов целевого применения современных космических радиолокационных комплексов (РЛК), существенным образом увеличивающим их информативность

за счёт использования фазы отражённого сигнала как носителя полезной информации [1–3] и обеспечивающих получение высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР), фазовый мониторинг приграничных территорий, нестабильных склонов, отслеживание изменений на объектах и др.

Цель работы – рассмотреть основы построения и провести сравнительный анализ методов интерферометрических измерений относительного рельефа местности при обзоре земной поверхности с субметровым пространственным разрешением для перспективного КА РЛК «Кондор-ФКА», основываясь на опыте, полученном в ходе лётных испытаний КА «Кондор-Э».

### Специфика интерферометрического мониторинга

Для интерферометрического формирования рельефа местности необходимо получить при разных ракурсах наблюдения, по крайней мере, пару радиоголограмм одного и того же участка местности. Необходимым условием успешной обработки полученных радиоголограмм является обеспечение их взаимной когерентности. Для этого должен быть выполнен ряд условий по стабильности характеристик излучаемого зондирующего сигнала, геометрии радиолокационной съёмки, постоянству параметров среды распространения зондирующего сигнала и отражающей подстилающей поверхности (минимизация временной декорреляции данных).

Кроме того, уровень когерентности (корреляции) интерферометрических данных непосредственно зависит от диапазона рабочих частот. Известно [1, 2], что электромагнитные волны (ЭМВ) хорошо рассеиваются объектами, геометрические размеры которых сопоставимы с их длиной. Если размеры объектов меньше, чем длина волны, наблюдается интерференция, а если объект больше длины волны, начинает преобладать отражение сигнала от частей объекта. Если рассматривать эти свойства рассеяния применительно к растительному покрову, например, к лесу, то сигнал коротковолновых РСА будет в значительной степени рассеиваться верхушками деревьев, а ЭМВ дециметрового диапазона в большей степени отражаться от подстилающей поверхности. Разумеется, эти выводы носят самый общий характер, поскольку не учитываются

иные факторы: затенение, переизлучение, преодоление границ сред проникновения и т.п.

Вместе с тем, следует учитывать тот факт, что с увеличением длины волны по отношению к размеру отражающего элемента разрешения, отражённые ЭМВ становятся всё менее интенсивными, и эффективная поверхность отражения (ЭПО) поверхности довольно быстро падает. Поэтому для поверхности, не покрытой высокой и густой растительностью, предпочтение при выборе длины волны отдаётся коротковолновому диапазону:  $\lambda \approx 3..9$  см.

ЭМВ с более короткими длинами волн подвержены серьёзным искажениям и потерям при распространении и не обеспечивают выполнения требований большой дальности наблюдения и независимости от погодных условий. Особенно это проявляется при интерферометрическом мониторинге. Более подробно вопросы целевого применения космических систем (КС) радиолокационного наблюдения (РЛН), определяющие специфику интерферометрического мониторинга, рассматриваются ниже.

### Варианты построения интерферометрического комплекса

За период практического применения космической радиолокационной интерферометрической съёмки, насчитывающего уже более двух с половиной десятилетий, было реализовано большое количество различных вариантов построения интерферометрических КС РЛН, которые можно объединить в три основных варианта.

Эффективным способом проведения интерферометрической съёмки, ориентированным, прежде всего, на оценивание рельефа местности, является **бистатический**, предусматривающий одновременный приём отражённого сигнала на две разнесённые в пространстве на величину интерферометрической базы самостоятельные антенны. Впервые этот вариант был реализован в 2000 году с использованием «жесткой» интерферометрической базы, обра-

зованной двумя антеннами, установленными на борту космического корабля Shuttle (программа SRL, миссия SRTM, США). Ещё один вариант бистатического интерферометрического комплекса реализован в настоящее время с использованием КА РЛН Terrasar-X, TanDEM-X (Германия), расположенных на одной орбите на близком расстоянии друг от друга. Расстояние между двумя КА образует интерферометрическую базу, величина которой варьируется в интервале от сотен метров до нескольких километров. Достоинство данного варианта – большое и в широких пределах изменяемое значение базы, высокая точность интерферометрических измерений и отсутствие временной декорреляции парных отражений. Недостатки – необходимость поддержания группировки из двух КА на согласованных орбитах, необходимость точного измерения взаимного положения двух КА и использования линии синхронизации работы двух радиолокаторов.

Несмотря на все достоинства рассмотренного выше варианта, наибольшее распространение в мире получил вариант **многопроходной интерферометрии**, предусматривающий проведение разновременных съёмок с использованием одного или нескольких идентичных КА. Целью проведения съёмки является получение цифровых моделей рельефа, формирование карт высотных смещений местности, когерентное детектирование изменений на местности. За рубежом такой вариант был реализован на КА РЛН ERS, ENVISAT, Sentinel (ESA), RADARSAT (Канада), COSMO-SkyMed (Италия), ALOS (Япония) и др.

Важным условием формирования системы многопроходной интерферометрии является её баллистическое построение. Для обеспечения возможности проведения интерферометрической съёмки КА РЛН должны двигаться внутри узкой «интерферометрической трубки», диаметр которой определяется размерами необходимой интерферометрической базы. Положение данной «интерферометрической трубки» относительно снимаемой земной по-

верхности должно быть жёстко зафиксировано на протяжении всего срока активного существования КА РЛН. Выход КА РЛН за пределы указанной «трубки», а также её собственная нестабильность приводит к потере взаимной когерентности данных интерферометрической съёмки, получаемых на протяжённом интервале времени и исключает возможность их интерферометрической обработки. Величина интерферометрической базы не должна превышать предельного (критического) значения, которое зависит от режима съёмки, разрешения, угла съёмки и дальности до земной поверхности.

Баллистическое построение КА РЛН достигается запуском КА РЛН на орбиты, имеющие одинаковые наклонения и высоты и определённые величины долготы и времени восходящего узла. Периодичность интерферометрической съёмки одним КА РЛН определяется периодом замыкания его орбиты, составляющим обычно несколько суток. В случае наличия в составе КА РЛН нескольких КА периодичность интерферометрической съёмки соответственно повышается.

Одним из недостатков данного варианта построения интерферометрического комплекса, актуальным также и для других вариантов, является сложность управления движением КА РЛН в целях поддержания стабильности орбиты на протяжённом интервале времени, соответствующем сроку активного существования.

Одновременно, для обеспечения заданной точности измерения высоты рельефа и его изменений, точность определения интерферометрической базы должна составлять единицы сантиметров, что обеспечивается путём разработки специального навигационно - баллистического обеспечения КА РЛН.

Кроме того, для обеспечения высокой эффективности интерферометрической съёмки необходимо проведение контроля параметров среды распространения зондирующего сигнала и состояния подстилающей поверхности, которые могут существенным образом меняться за период времени между съёмками. Решение

этой задачи требует разработки технологии информационного обеспечения процессов планирования целевого применения КА РЛН и обработки целевой информации с соответствующими априорными и апостериорными данными. В частном случае влияние параметров среды распространения на эффективность интерферометрической съёмки может быть уменьшено путём выбора параметров орбиты, обеспечивающего проведение съёмки двумя КА РЛН с минимальным (не более 20...30 мин) временным интервалом (квазитандемная съёмка).

Менее точным, но просто реализуемым, является **многосеансовый «однопроходный»** способ съёмки с применением одного КА, получивший название «скошенного обзора». В этом режиме один и тот же участок поверхности Земли облучается несколько раз в пределах одного рабочего участка орбиты. Такой интерферометрический режим может представлять собой модификацию режима съёмки, в котором азимутальное электронное отклонение используется для осуществления переднебокового или заднебокового обзора. Реализация такого режима позволяет без доработки бортовой радиолокационной аппаратуры только за счёт введения новых технологий её управления и наземной обработки радиолокационной информации обеспечить при сохранении точностных параметров выходных информационных продуктов значительный выигрыш при проведении интерферометрической съёмки в части:

- устранения временной декорреляции, присущей данным, полученным в многопроходных режимах съёмки;
- повышения оперативности получения интерферометрических данных за счёт реализации технологического цикла съёмки в рамках одного сеанса;
- повышения общей производительности и экономии бортового ресурса КА РЛН;
- обеспечения гибкости наземной обработки данных, позволяющей использовать переменную интерферометрическую базу, а так-

же реализовать в процессе обработки данных, полученных в течение одного сеанса синтеза апертуры несколько циклов формирования ЦМР с последующим их усреднением и уточнением.

При этом необходимо уточнить, что все указанные выше преимущества рассматриваемого варианта относятся только к случаю получения данных внутри одного сеанса наблюдения. В условиях проведения съёмки в режиме «скошенного» обзора на различных витках все проблемы, возникающие в режиме многопроходной интерферометрии, по-прежнему сохраняют свою актуальность.

Рассмотрим варианты построения интерферометрических комплексов более подробно.

#### **Бистатистический интерферометр с поперечным смещением**

Организация бистатистического интерферометра, состоящего из двух носителей РСА со смещением по высоте  $\Delta H$  или в поперечном направлении  $\Delta Y$ , имеет принципиальное отличие от других рассматриваемых вариантов. Один КА с РСА в этом случае облучает, и оба практически одновременно принимают отражённые от земной поверхности сигналы. Относительные изменения сигналов из-за рельефа местности проявляются только при «возвращении» отражённого сигнала. Неоспоримым достоинством этого варианта является одновременность приёма парных сигналов, что определяет его высокую помехозащищённость к факторам пространственной и временной декорреляции.

Для детального анализа воспользуемся прямоугольной подвижной путевой системой координат (ПСК)  $O_0XYZ$ , расположенной в центре масс КА, ориентированной таким образом, чтобы вектор относительной скорости с учётом вращения Земли, в данной точке орбиты  $V$  в начальный момент времени  $t = 0$  находился в плоскости  $XO_0Z$ .

На рис.1 представлена геометрическая схема и пример работы бистатистического интерферометра с поперечным смещением носителей

РСА в начальный момент времени  $t = 0$ . Чтобы не загромождать построения, ПСК вынесена из центра КА и приведена отдельно в верхнем углу. Космические аппараты КА1 и КА2 двигаются по линии пути ЛП1 и ЛП2 соответственно в течение сеанса практически параллельно. Расстояние от фазового центра антенны (ФЦА) первой РСА до выбранной точки на поверхности при отсутствии отклонений рельефа местности обозначено через  $R_0$ ;  $h$  – значение относительного рельефа местности;  $H$  – высота орбиты КА1;  $\theta_0$  – угол падения между направлением на исследуемую точку (без учёта рельефа) и направлением в надир.

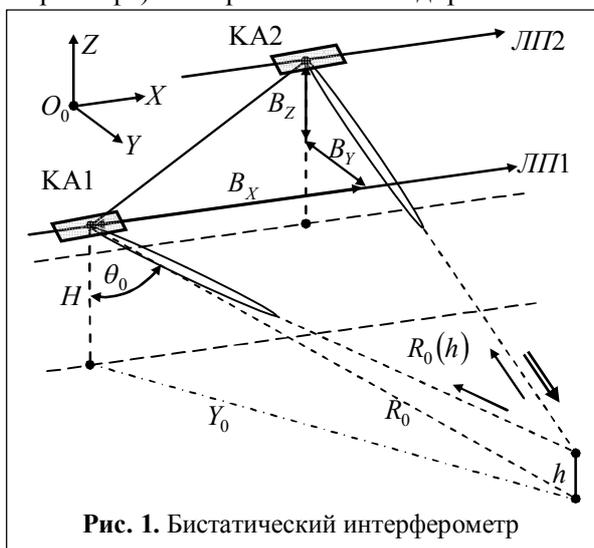


Рис. 1. Бистатический интерферометр

Формирование такого интерферометра требует сложного относительного маневрирования носителей на расстояниях до нескольких сотен метров [3–6]. Определим разность фаз парных сигналов бистатического комплекса в случае смещения «пассивного» носителя в ортогональных направлениях  $B_y, B_z, B_x$ :

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{HB_z + Y_0 B_y + B_x^2 / 2}{R_0} + \frac{(2HB_z + H^2)(Y_0^2 + 2(Y_0 B_y + B_x^2 / 2))}{2R_0^3} \right) - h \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{B_z}{R_0} + \frac{H(Y_0 B_y + B_x^2 / 2)}{R_0^3} \right),$$

где  $Y_0 = R_0 \sin(\theta_0)$ ,  $H = R_0 \cos(\theta_0)$ ,

$$R_0(h) = \sqrt{(H - h)^2 + Y_0^2}.$$

Первые две составляющие разности фаз компенсируются по априорной информации (компенсация «ровной» поверхности), поэтому искомую разность фаз можно записать в виде:

$$\Delta\ddot{\phi} \approx \frac{2\pi h}{\lambda} \left( \frac{B_z}{R_0} + \frac{H(Y_0 B_y + B_x^2 / 2)}{R_0^3} \right) = \frac{2\pi h}{\lambda} \left( \frac{B_y \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) + B_z}{R_0} + \frac{B_x^2 \cos(\theta_0)}{2R_0^2} \right).$$

К примеру, если базовое смещение будет только в поперечном направлении  $B_y = 1000$  м, а угол визирования  $\theta_0 \approx 60^\circ$ , для величины высоты рельефа  $h \approx 10$  м получаем разность фаз принимаемых сигналов  $\Delta\ddot{\phi} \approx 30^\circ$ , что вполне достаточно для точных интерферометрических измерений.

С помощью несложных преобразований из оценки разности фаз можно извлечь оценку значения местного рельефа (без учёта неоднозначности):

$$\hat{h} \approx \frac{\lambda R_0}{2\pi B_\perp} \frac{\Delta\ddot{\phi}}{\sin(\theta_0)},$$

где  $B_\perp = B_y \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) + B_z$ .

Собственно это восстановленное значение и определяет относительный местный рельеф, который «добавляется» к известному среднему уровню и поступает на преобразование и формирование ЦМР.

Нормированный коэффициент пространственной корреляции (КПК), характеризующий относительные изменения парных сигналов, можно найти, используя известные определения [7–9]:  $r_e = \overline{e_{mn}^0 e_{mn}^{1*}} / D_e$ , где  $e_{mn}^0, e_{mn}^1$  – комплексный коэффициент рассеяния разрешаемой площадки поверхности для «активной» и «пассивной» позиции;  $D_e$  – дисперсия коэффициента рассеяния, между комплексными коэффициентами рассеяния одного элемента поверхности;  $\overline{\phantom{x}}$  – математическая операция усреднения.

В общем случае для однородной поверхности, в предположении высокой степени «прямоугольности» импульса по дальности и низ-

кого уровня боковых лепестков нормированный коэффициент пространственной корреляции определяется следующим образом [7–9]:

$$r_e \approx \frac{\sin(\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \delta y / (\lambda Y_0))}{(\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \delta y / (\lambda Y_0))},$$

где  $\delta y = \frac{\delta r}{\sin(\theta_0)}$  – разрешение по горизонтальной дальности.

Пример:  $\lambda = 9$  см,  $H = 500$  км,  $\theta = 60^\circ$ ,  $B_Y = 7$  км,  $B_Z = 0$  км,  $\delta r \approx 1$  м.

При этом парная корреляция будет высокой:  $r_e \approx 0,7$ , что подтверждает качество этой схемы построения. Продольное смещение внесёт свои корректировки при определении КПК, но при боковом обзоре они имеют не столь значительный вклад.

Можно оценить предельное значение базового параметра, считая допустимым снижение КПК парных сигналов до уровня 0,7...0,8:

$$B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) \leq \frac{\lambda R_0 \cos(\theta_0)}{4 \delta y}.$$

Чем выше разрешающая способность и больше дальность, тем меньше изменяется сигнал при пространственном смещении носителей РСА. Таким образом, размер базового параметра в этой схеме построения интерферометра:  $(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \approx 5...12$  км, вполне допустим при разрешающей способности  $\delta r = 0,7...1,4$  м.

Как минимум, ещё два фактора серьёзно влияют на относительные изменения отражённого сигнала при бистатистическом наблюдении: местный рельеф (отклонение от среднего) и уклон земной поверхности в месте наблюдения. Эти факторы необходимо учесть при определении КПК [7–9]:

$$r_e \approx \frac{\delta y'' \sin(\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \delta y'' / (\lambda Y_0))}{\delta y \frac{\sin(\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \delta y'' / (\lambda Y_0))}{(\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) \delta y'' / (\lambda Y_0))}},$$

где  $\delta y'' = \delta y - \delta y^\Delta$ ,  $\delta y^\Delta \approx \Delta r^h / \sin(\theta'_0)$ ,

$$\Delta r^h \approx \left( \frac{h}{R_0} B_Y \cos(\theta'_0) \right)^2, \quad \delta y \approx \delta r / \sin(\theta'_0 - \mu_y),$$

$$\theta'_0 \approx \arccos\left(\frac{H-h}{R_0}\right), \quad \mu_y - \text{уклон поверхности}$$

по оси  $Y_c$ .

В этом случае предельный перепад высот для бистатистического измерителя (при уклонах поверхности до  $20^\circ$ ):

$$h^{mp} \leq \frac{0,2 \delta r R_0}{(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)) (1 + \mu_y \operatorname{ctg} \theta'_0) \cos(\theta'_0)^2}.$$

В случае превышения этого предела необходимо провести дополнительную подготовку и повторное измерение (двухэтапная или многоэтапная обработка с рекуррентной детализацией).

Обычно [1, 9] общую погрешность измерения относительного рельефа местности, с предположением о некоррелированности отдельных параметров, можно выразить через сумму дисперсий отдельных составляющих: оценки разности фаз, оценки угла, измерения высоты орбиты, измерения расстояния до элемента разрешения, знания размера базы.

Наибольшее внимание уделяется анализу погрешностей, связанных с оценкой разности фаз. Среднеквадратическая ошибка измерения относительной высоты рельефа в бистатистическом варианте с поперечным смещением определяется соотношением [9]:

$$\sigma_h \approx \frac{(\lambda R_0)}{(2\pi(B_Y + B_Z \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)))} \sqrt{\left( \frac{1}{q_{c/ш}} + \frac{(1-r_e)}{2} \right)},$$

где  $q_{c/ш}$  – отношение сигнал/шум после РСА обработки.

Пример:  $\lambda = 9$  см,  $H = 500$  км,  $\theta = 60^\circ$ ,  $\delta r \approx 1$  м,  $B_Y \approx 7...10$  км,  $q_{c/ш} = 10...20$ ,  $r_e \approx 0,7$ .

В этом случае ошибка измерения относительного рельефа будет:  $\sigma_h \approx 1,5...2$  м при наблюдении за поверхностью без значительных уклонов и радиоконтрастных аномалий. При наличии уклона поверхности  $\mu_y = 10...15^\circ$  в среднем на 2...3 м понижается точность оценивания относительного рельефа, особенно при больших углах падения.

Для устойчивого функционирования бистатического РЛК требуются обеспечить синхронизацию обеих разнесённых составных частей как единого устройства [3], т.е. обеспечить три вида синхронизации:

– передающая и приёмная ДНА должны быть направлены на один участок земной поверхности (пространственная синхронизация);

– на приёмной позиции должны быть точно известны моменты времени излучения зондирующих сигналов на всем интервале накопления принимаемых отражённых сигналов (временная синхронизация);

– относительный уход частоты (фазы) колебаний задающих гетеродинов приёмной и передающей позиций должен обеспечиваться с высокой точностью.

Точность определения координат объекта, исходя из относительной погрешности определения положения двух КА (точность знания базы интерферометра), составляющих вектора скорости, как наиболее весомых, в условиях однородной поверхности без отклонения рельефа, можно определить смещением точечного отражателя по дальности относительно ФЦА двух КА:

$$\Delta r(t) \approx \Delta B_y \sin(\theta_0) + \Delta B_z \cos(\theta_0) + \frac{B_x V}{R_0} t + \Delta V_y \sin(\theta) t,$$

где  $\Delta V_y$  – ошибка относительного отклонения скорости носителей в направлении, ортогональном движению.

Допустимая ошибка определения наклонной дальности (здесь и далее допустимая погрешность выбирается из условия относительного сдвига изображений на десятую часть элемента разрешения) определяет верхний предел погрешности измерения базовой линии

$$\Delta B_y \sin(\theta_0) + \Delta B_z \cos(\theta_0) \leq \frac{\delta r}{10} \approx 7...10 \text{ см} .$$

Относительное смещение изображений по азимуту также накладывает ограничения на точность определения относительного положения двух КА вдоль линии пути:

$$\Delta X \leq \frac{\delta x}{10} \approx 7...10 \text{ см} ,$$

где  $\delta x$  – разрешающая способность вдоль линии пути. Соответственно, точность знания относительного отклонения скорости двух КА:

$$\Delta V_y \leq \frac{\delta x V}{10 R_0 \sin(\theta)} \approx 10^{-3} ... 10^{-4} \text{ м/с} .$$

Очевидно, что для обеспечения требуемой точности знания относительного положения и движения КА необходимо применять дополнительные меры с привлечением высокоточных дальномеров, систем дифференциального и относительного позиционирования.

### Однопроходный интерферометр с двумя КА на орбите

На рис.2 представлена геометрическая схема однопроходного интерферометра с двумя КА, которые следуют друг за другом на расстоянии 50...300 км. Первый носитель с РСА производит облучение и приём сигнала от объекта наблюдения. Через несколько десятков секунд второй носитель с РСА производит подобную операцию, но за это время объект исследования смещается на определённое расстояние за счёт движения Земли, сформировав тем самым базовую линию. Для пространственного разрешения меньше метра базовое смещение может достигать до десятка километров при достаточно высокой корреляции парных сигналов.

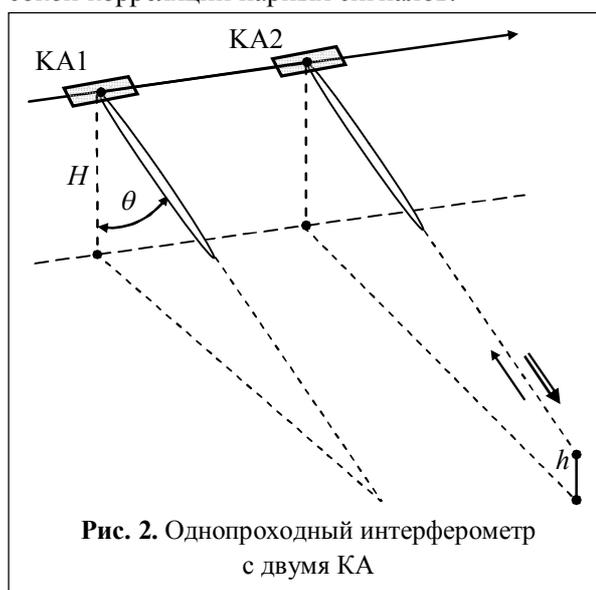


Рис. 2. Однопроходный интерферометр с двумя КА

Для анализа возможностей однопроходного интерферометра определим разность фаз парных сигналов от одного точечного отражателя на земной поверхности, в случае смещения Земли между сеансами наблюдения  $B_3 = W_3 T_0 \sin(q) \cos(\gamma)$  ( $q$  – наклонение орбиты,  $\gamma$  – угол отклонения вектора движения Земли относительно нормали к вектору скорости носителя) из-за относительного рельефа местности  $h$ :

$$\Delta\ddot{\phi} \approx h \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta_0 + \beta_0) \frac{B_3 \sin(\theta) \cos(\theta)}{R_0}$$

где  $\beta_0$  – угол между направлением на КА от центра зоны обзора и плоскостью местного горизонта.

Из этой разности можно извлечь оценку значения местного рельефа:

$$\hat{h} \approx \frac{\lambda R_0}{4\pi B_{\perp}} \frac{\Delta\ddot{\phi}}{\sin(\theta_0 + \beta_0)},$$

где  $B_{\perp} = W_3 T_0 \sin(q) \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)$ .

Для представляемой схемы коэффициент пространственной корреляции парных сигналов определяется следующим образом:

$$r_e \approx \frac{\sin(2\pi B_{\perp} \delta y / (\lambda Y_0))}{(2\pi B_{\perp} \delta y / (\lambda Y_0))}$$

Среднеквадратическая ошибка измерения рельефа местности:

$$\sigma_h \approx \frac{\lambda R_0}{4\pi B_{\perp} \cos\theta \sin\theta} \sqrt{\frac{1}{q_{c/ш}} + \frac{1-r_e}{2}}$$

Пример:  $\lambda = 9$  см,  $H = 500$  км,  $\theta = 60^\circ$ ,  $B_{\perp} = 7 \dots 10$  км,  $\delta r = 1$  м,  $q_{c/ш} = 10 \dots 20$ ,  $r_e \approx 0,6$ . Только в этом случае можно рассчитывать на точность измерения относительного рельефа  $\sigma_h \approx 0,7 \dots 1$  м при наблюдении за однородной поверхностью без значительных уклонов и радиоконтрастных аномалий.

Требования к измерению относительного положения двух КА для данной схемы построения интерферометра в два раза выше (двойное расстояние на передачу и приём), чем в случае бистатического варианта:  $\Delta B_{\perp} \approx \Delta X \leq 4 \dots 8$  см,  $\Delta V_y \approx 10^{-4}$  м/с.

Вместе с тем, неоспоримым достоинством этого метода является отсутствие необходимости синхронизации комплекса с межбортовым обменом.

### Однопроходный интерферометр при "скошенном" обзоре

На рис. 3 представлена геометрическая схема однопроходного интерферометра при "скошенном" обзоре рельефной поверхности [8–10, 12]. Наблюдение за выбранным участком земной поверхности производится РСА некоторое время  $T$ , в общем случае превышающее время синтеза апертуры антенны  $T_c$ . Формируется несколько сеансов наблюдения, количество которых определяется соотношением длины интервала синтеза РСА и размера базового параметра  $B_0 = VT_0$ , который определяется как смещение между сеансами наблюдения вдоль оси  $O_0 X_c$ .

На рис.3 показано положение носителя РСА в начальный момент времени  $t = 0$  и в момент начала следующего сеанса наблюдения  $t = T_0$ . Луч антенны РЛС при угле падения  $\theta_0$  отклонён вперёд на угол  $\alpha_0$  относительно угла «нулевой доплеровской частоты» (при боковом обзоре). Это условие «скошенности»:  $|\alpha_0| > 0^\circ$ , накладывает дополнительные ограничения на получение карты земной поверхности и усложняет обработку принятого сигнала, но вместе с тем имеет ряд интересных особенностей, позволяющих производить интерферометрические измерения за один проход носителя РСА. Интерферометр организуется за счёт естественного пролёта носителя.

В смежных сеансах съёмки разность фаз парных сигналов одного точечного отражателя можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta\phi(T_0, h) &= \frac{4\pi}{\lambda} (\delta\tilde{r}(t, h) - \delta\tilde{r}(t + T_0, h)) = \\ &= \frac{2\pi h}{\lambda R_0} B_0 \sin(2\theta_0) \sin(\alpha_0). \end{aligned}$$

С помощью несложных преобразований из этой оценки можно извлечь значения местного рельефа. Определяющими, при этом будут:

базовый параметр  $B_0$ , длина волны  $\lambda$ , дальность  $R_0$  и угол «скошенности»  $\alpha_0$ .

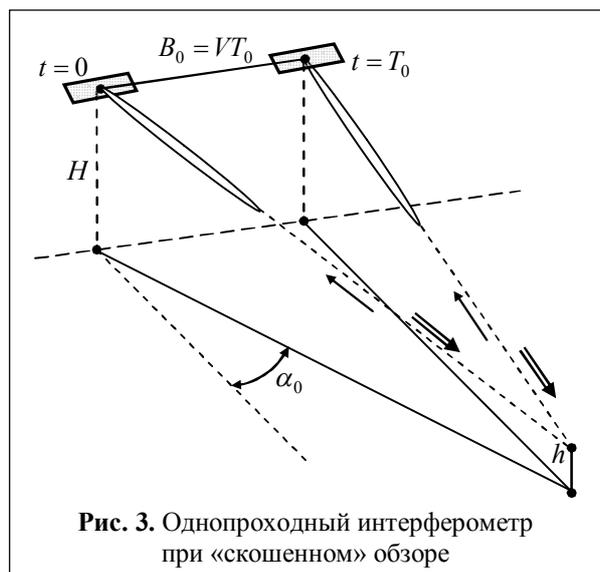


Рис. 3. Однопроходный интерферометр при «скошенном» обзоре

Можно оценить предельное значение базового параметра, считая допустимым снижение КПК парных сигналов:  $B_0 \leq \lambda R_0 / (4 \delta x \cos(\alpha_0))$ .

Смещение между сеансами наблюдения может достигать  $B_0 \approx 9...16$  км при разрешающей способности РСА  $\delta x \approx 1$  м и  $\alpha_0 \approx 1...10^\circ$ ,  $\lambda \approx 9$  см.

Среднеквадратическая ошибка измерения относительной высоты рельефа для однопроходного варианта с одним КА на орбите определяется соотношением:

$$\sigma_h \approx \frac{(\lambda R_0)}{(4\pi B_0 \cos(\theta) \sin(\alpha_0))} \sqrt{\left(\frac{1}{q_{c/ш}} + \frac{(1-r_e)}{2}\right)}$$

**Пример.** Пусть имеем  $\lambda = 9$  см,  $H = 500$  км,  $\theta = 60^\circ$ ,  $\delta x = 1$  м,  $q_{c/ш} = 10...20$ ,  $\alpha_0 \approx 1...2^\circ$ . Тогда можно рассчитывать на точность измерения относительного рельефа  $\sigma_h \approx 7...10$  м, в то время как при углах  $\alpha_0 \approx 5...10^\circ$ , точность измерения:  $\sigma^b \approx 4...6$  м.

Кроме того, если «скошенность» сформировать по одному и тому же объекту последовательно несколько раз, то можно повлиять на точность измерения высоты рельефа и облегчить задачу раскрытия фазовой неоднозначности.

Экспериментальная отработка метода «скошенного» полосового интерферометра проводилась по цифровым радиолограммам РСА «Кондор-Э» [11]. Во время эксперимента луч реальной ДНА был смещён относительно нормали к линии пути на  $\alpha \approx 0,6...1,7^\circ$ . Базовое смещение между сеансами наблюдения было выбрано:  $B_0 \approx 0,16 X_c$ ,  $X_c$  – интервал синтезирования.

На рис. 4 представлено спутниковое оптическое изображение, интерферограмма (разность фаз парных сигналов), восстановленный рельеф гористой местности (РЛМ). Цветом РЛМ указывается относительная высота рельефа. Для «ровной» поверхности базовое смещение интерферометра может достигать четверти интервала синтезирования [8,10]. Удовлетворительные результаты по измерению рельефа местности были получены при базовом смещении в два раза меньшем. Это объясняется тем, что отражения зондирующего сигнала происходили от гористой местности с большими уклонами и «разрывами» рельефа, что значительно повышает декорреляцию парных сигналов.

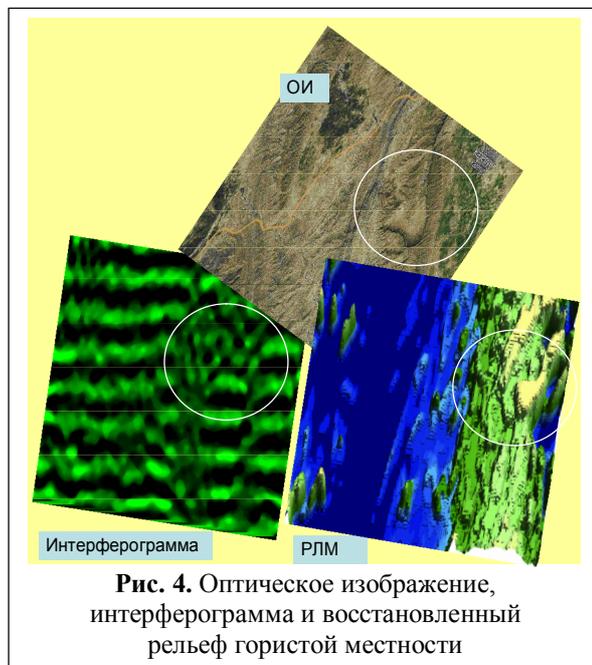


Рис. 4. Оптическое изображение, интерферограмма и восстановленный рельеф гористой местности

На рис.4 отмечен характерный участок местности с максимальным отклонением по

высоте, что видно как на интерферограмме, так и на трёхмерной карте рельефа местности.

Интерферограмма указывает, что относительный рельеф этого участка столь велик, что разность фаз находится на грани фазовой неоднозначности, а возможно в некоторых деталях «переходит» эту неоднозначность. Однозначный диапазон высот местного рельефа при условиях эксперимента составил  $h_0 \approx 2$  км, что в данном случае характеризует относительный перепад высот.

На рис. 5 представлены топографическая карта и восстановленный сложный гористый рельеф Тибетского хребта Даляньшань ( $B_0 \approx 5000$  м,  $\alpha_0 \approx 1,7^\circ$ ). Известны перепады высот основных вершин, из которых выбраны две для сравнения. График оцененных высот (срез вдоль линии пути) также представлен на рис. 5. Данные топографической карты близки к данным, полученным с помощью космического однопроходного интерферометра при «скошенном» обзоре, несмотря на сложность рельефа.

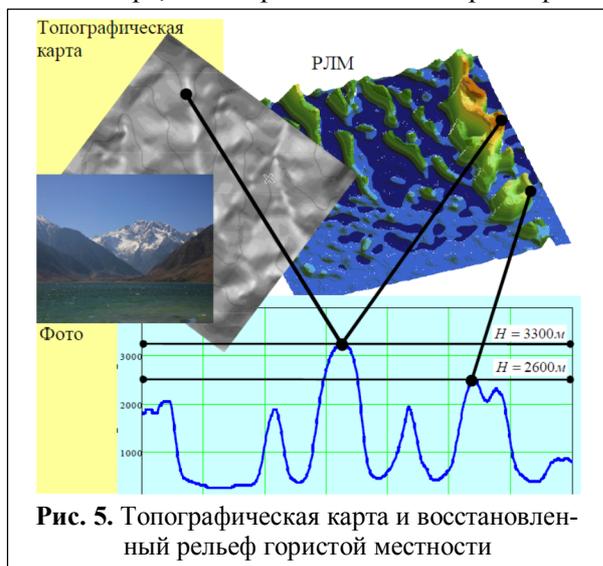


Рис. 5. Топографическая карта и восстановленный рельеф гористой местности

На рис.6 представлено спутниковое оптическое изображение и рельеф сложной гористой местности ("Вьетнамская ривьера",  $B_0 \approx 5000$  м,  $\alpha_0 \approx 1^\circ$ ).

В этом случае также точно известны перепады высот двух самых известных мест этого полуострова, фотографии которых представлены на рис.6. Эти данные очень близки (по пе-

репаду высот и относительному рельефу) к данным, полученным с помощью космического однопроходного интерферометра при «скошенном» обзоре. На рис.6 представлены графики, представляющие «срезы» РЛМ вдоль линии пути, проходящие через отмеченные точки с известной высотой.

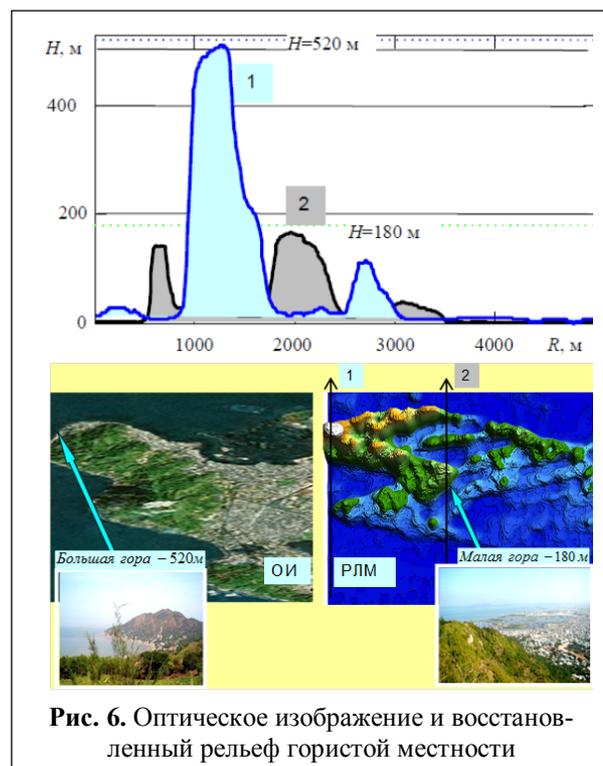


Рис. 6. Оптическое изображение и восстановленный рельеф гористой местности

На рис.7 показаны: фрагмент традиционного РЛИ (пониженное разрешение), результат оценки с контурами одинаковых высот (справа вверху), фотоизображение с контурами одинаковых высот (слева внизу) и сечение рельефа по стрелке. При всём том, что в оценке совершенно очевидно сильное влияние теней, сама оценка представляется удовлетворительной и близкой к измеренным ранее значениям. Измеренный размер озера 4...5 км, высота до 1350 м относительно основания высотой 300...400 м.

### Заключение

Наличие в РФ обширных территорий со значительным растительным покровом и высокая изменчивость погодных условий определяют целесообразность и преимущества измерения местного рельефа с помощью однопроходного и бистатического РСА интерферометров, по-

строенных на базе систем космического мониторинга субметрового пространственного разрешения.

Вместе с тем, простота реализации, гибкость, помехоустойчивость и, особенно, экономичность однопроходного метода с одним КА определяют его высокую конкурентоспособность при решении задач детального интерферометрического измерения рельефа местности.

### Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки. Дешифрирование радиолокационных изображений / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков и др. Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 530 с.
2. Геоинформатика: в 2 кн. / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарёв, В.С. Тикунов и др.; Под ред. В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия»,

2008. – Кн.1- 384 с.; Кн.2-384 с.

3. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Basic Product Specification Document. DLR, Germany. – 2008. TX-GS-DD-3302. TX-GS-DD-3302\_Basic-Product-Specification-Document\_1.5.pdf.

4. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Level 1b Product Format Specification. DLR // Germany. – 2008. TX-GS-DD-3307. 030201\_Level-1b. Product-Format-Specification\_1.3.pdf.

<http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php>.

5. Zin M., Krieger G., Fiedler H., Moreira A. The TanDEM-X Mission Concept // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. Vol. 4, pp.31-34.

6. Rodriguez-Cassola M., et. al. First Bistatic Spaceborne SAR Experiments With TanDEM-X // IEEE geoscience and remote sensing letters. Vol. 9. No. 1. January 2012, pp. 33-37.

7. Бабокин М.И. Оценка топографического рельефа местности в РСА при переднебоковом обзоре // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред.

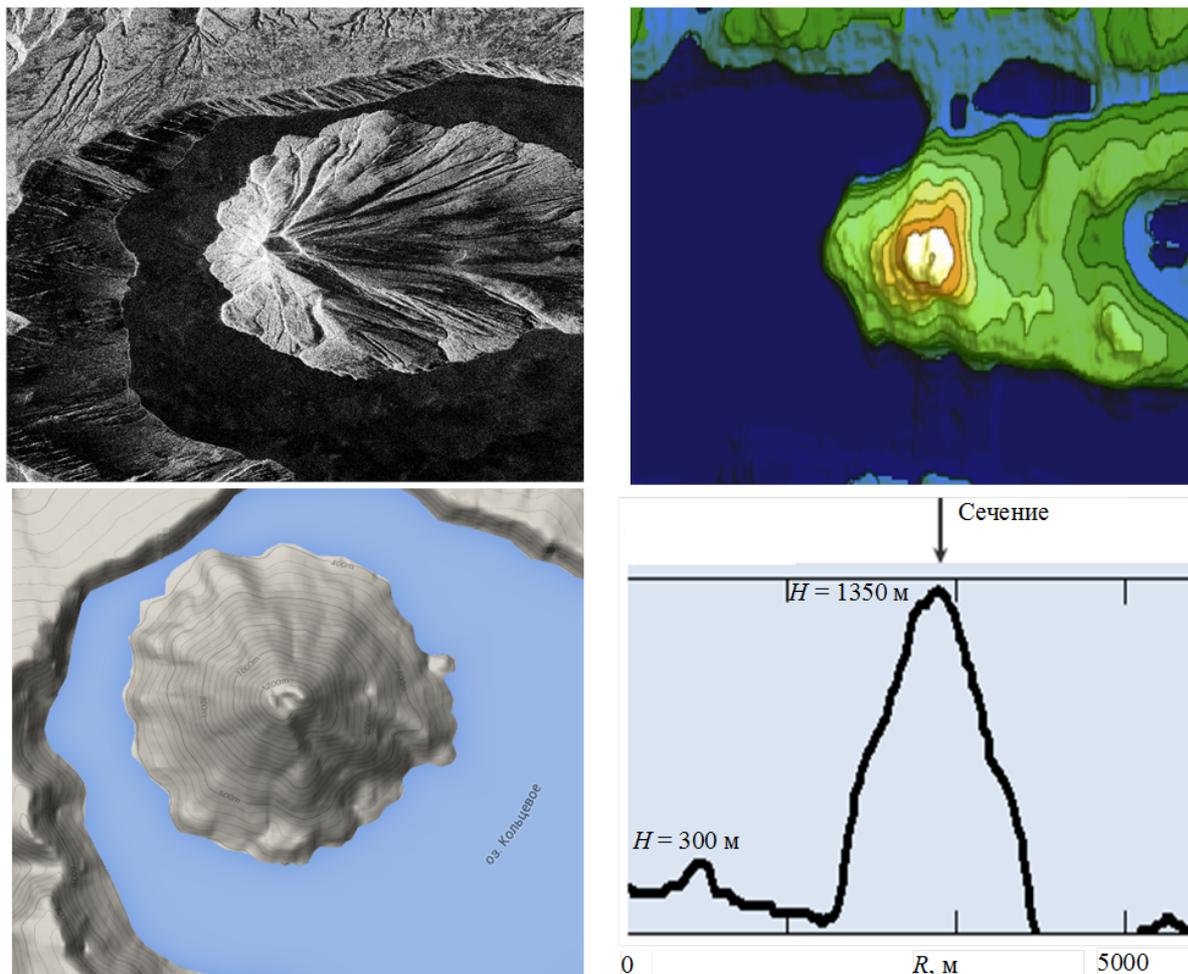


Рис. 7. Оценка рельефа местности при переднебоковом обзоре

Е.Ф. Толстова. – Смоленск, Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. – С.171-181.

8. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА // Радиотехника. – 2009. №7. С.51-58.

9. Бабокин М.И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. № 10. С.65-72.

10. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. – 2014. №7. С.16-20.

11. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.

12. Diego Calabrese. Acquisition of SAR images for computing a height or digital elevation model by interferometric processing. – EP2535735A1, 19 декабря 2012.

Поступила 10 июля 2017 г.

English

### Terrain pattern estimation by SAR of SV Kondor-E series

**Mikhail Ivanovich Babokin** – Doctor of Engineering, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

*E-mail:* m.baboki@hotmail.ru.

**Alexander Vitalyevich Yefimov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

*E-mail:* Alexef@front.ru.

*Address:* 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

**Evgeny Aleksandrovich Kostiuk** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, RS EOM JSC RSS.

*E-mail:* ntsomz@ntsomz.ru.

*Address:* 127490, Moscow, Dekabristov Str., b.51, h. 25.

**Alexey Valeryevich Rakitin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Murom Institute (branch) Of “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs”.

*E-mail:* alexey.rakitin@mail.ru.

*Address:* 602264, Murom, Vladimir Region, Orlovskaya St., 23.

*Abstract:* Taking into account the flight tests of SAR (synthetic aperture radar) onboard Kondor-E space vehicle (SV), the fundamentals are surveyed and method comparative analysis is performed for interferometric measurements of relative terrain pattern when viewing the earth surface with submeter spatial resolution for perspective radar observation (RO) by SV Kondor-FKA, and also the intended application problems of radar observation (RO) space systems (SS) defining specific features of interferometric monitoring are considered. A large number of different options for developing interferometric RO SS is implemented during practical operation of space radar interferometric survey and those options can be grouped into three main options:

- 1) *the bistatic one* providing simultaneous reception of the echo signal into two independent antennas spaced apart for the value of interferometric basis,
- 2) *the multiple-pass option* providing multi-temporal survey using one or several identical space vehicles
- 3) *the multisession "one-pass" survey method named skewed survey* using one SV.

The bistatic and one-pass interferometer consisting of two space vehicles were thoroughly analyzed. Ratios for calculation of the current phase and flight path signal phase difference are obtained, and interrelation between local terrain pattern value and phase difference is found. The calculation examples of mean square measurement error for local altitude are given indicating the possibility of getting 1,5 ... 2 m errors in the S- range. The effect of slope surface effect, signal-to-noise ratio and of survey parameters on the survey quality for digital terrain pattern is examined. Particular attention is given to the research of skewed survey possibilities, which is performed by one space vehicle and which often occurs in radar space monitoring. Hologram processing results obtained by SAR of Kondor-E space vehicle are given. The obtained terrain pattern radar estimates manifest high informational content and efficiency of interferometric survey with using submeter resolution SAR. The work indicates that having vast territories with a large amount of vegetation and weather high variability in the RF determine expediency and advantages of local terrain pattern measurement by using one-pass and bistatic

SAR interferometer constructed on the basis of monitoring space for submeter spatial resolution. Along with this, the implementation simplicity, flexibility, noise stability and, especially, the efficient performance of one-pass method with one space vehicle determine its high competitiveness in problem solving of detailed interferometric measurement of terrain pattern.

*Key words:* remote sensing, synthetic aperture radar, interferometer, terrain pattern, skewed mode, radio hologram, radar image.

### References

1. Air reconnaissance radar systems. Radar image interpretation. - L.A. Shkolny, E.F. Tolstov, A.N. Detkov. - Ed. by L.A. Shkolny. - M.: VVIA publ.h. named after N. E. of Zhukovsky, 2008. - 530 p.
2. Geoscience: 2 books. - E.G. Kapralov, A.V. Koshkarev, V. S. Tikunov, other colleagues; Ed. by V. S. Tikunov. - M.: Publishing center "Akademiya", 2008. – B.1 - 384 p.; B.2-384 p.
3. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Basic Product Specification Document. DLR, Germany. - 2008. TX-GS-DD-3302. TX-GS-DD-3302\_Basic-Product-Specification-Document\_1.5.pdf.
4. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Level 1b Product Format Specification. DLR. - Germany. - 2008. TX-GS-DD-3307. 030201\_Level-1b. Product-Format-Specification\_1.3.pdf. <http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php>.
5. Zin M., Krieger G., Fiedler H., Moreira A. The TanDEM-X Mission Concept. - Proc. of EUSAR '2008, Friedrichshafen, Germany. June 2-5, 2008. Vol. 4, pp.31-34.
6. Rodriguez-Cassola M., et. al. First Bistatic Spaceborne SAR Experiments With TanDEM-X. - IEEE geoscience and remote sensing letters. Vol. 9. No. 1. January 2012, pp. 33-37.
7. Babokin M. I. Terrain pattern estimation in SAR stripmap mode. - SAR digital signal processing. - Ed. by E.F. Tolstov. - Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. – P. 171-181.
8. Babokin M. I. Relative terrain pattern assessment algorithms in SAR multipoint complexes. - Radiotekhnika. - 2009. No. 7. P. 51-58.
9. Babokin M. I. Measuring accuracy of relative ground surface terrain pattern in in SAR multipoint complexes. - Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchiye sistemy. - 2009. No. 10. P.65-72.
10. Babokin M. I., Yefimov A.V., Karpov O. A., Titov M.P. The one-pass interferometer in the stripmap mode. - Radiotekhnika. - 2014. No. 7. P. 16-20.
11. Babokin M. I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O. A., Kostrov V. V, Neromskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V. E., Tsvetkov O. E. Flight test results and lessons of SAR small-size Kondor-E space vehicle. - VI All-Russian Armand readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. – P. 16-36.
12. Diego Calabrese. Acquisition of SAR images for computing a height or digital elevation model by interferometric processing. - EP2535735A1, on December 19, 2012.