

УДК 621.396.96

## Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности

**Л.А.Бадак**, [badak\\_la@ntsomz.ru](mailto:badak_la@ntsomz.ru), АО «Российские космические системы», г. Москва.

**А.И.Захаров**, [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru), д. ф.–м.н., ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, МО.

**Е.А.Костюк**, к.т.н., [kostiuk@ntsomz.ru](mailto:kostiuk@ntsomz.ru), АО «Российские космические системы», г. Москва.

**В.Ю.Ширшова**, [shirshova\\_vu@ntsomz.ru](mailto:shirshova_vu@ntsomz.ru), АО «Российские космические системы», г. Москва.

**Аннотация.** В докладе рассмотрены вопросы повышения эффективности радиолокационной интерферометрической съемки участков земной поверхности с повторяющихся орбит космического аппарата за счет предварительного анализа их характеристик и выбора оптимальных условий и режимов наблюдения.

**Ключевые слова:** Космическая система радиолокационного наблюдения, космическая радиолокационная интерферометрическая съемка, цифровая модель рельефа местности.

Наблюдение земной поверхности в интерферометрических режимах съемки, обеспечивающих получение взаимно когерентных за протяженный интервал времени данных, в настоящее время рассматривается как один из основных способов целевого применения современных космических систем радиолокационного наблюдения (КС РЛН) при решении большинства задач и является ее важной особенностью.

Технология целевого применения КС РЛН в интерферометрических режимах съемки сопряжена с значительными затратами бортового ресурса, отличается высокой сложностью и возможность ее эффективной реализации зависит от большого количества факторов. В этой связи в целях оптимизации технологического процесса интерферометрической съемки в целях формирования цифровых моделей рельефа (ЦМР) участков земной поверхности возникает необходимость предварительного анализа их характеристик и выработки методических рекомендаций по условиям и режимам проведения съемки.

Ниже приводятся основные методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки земной поверхности, полученные на основании анализа имеющегося опыта целевого применения современных КС РЛН, которые будут уточняться и дополняться с течением времени.

### Выбор оптимального времени года.

Выбор оптимального времени года интерферометрической съемки заявленного района осуществляется на подготовительном этапе планирования интерферометрической съемки по результатам анализа его характеристик исходя из обеспечения требуемого качества (прежде всего, взаимной когерентности) получаемых радиолокационных данных.

При выборе оптимального времени интерферометрической съемки территории России необходимо учитывать следующее [ 4 ]:

- характер изменения когерентности получаемых данных и её абсолютные значения различны для разных природных зон и имеют сезонную динамику.

- наибольшее негативное влияние на когерентность получаемых данных радиолокационного наблюдения оказывает переход температуры земной поверхности через ноль, что приводит к значительному изменению ее отражательных характеристик из-за изменения диэлектрических свойств отражающей поверхности и практически полному нарушению когерентности (кроме участков в населенных пунктах).

- на территории лесных участков максимальное значение когерентности наблюдается зимой, а в остальное время держится на более низком уровне - 0.1 - 0.15. При этом съемки лесных массивов летом возможны только с короткими интервалами между съемками ввиду высокой изменчивости их отражательных характеристик.

- в тундре высокие значения когерентности наблюдаются зимой - 0.5 - 0.7. На возвышенных участках в силу низкой разреженной растительности высокая когерентность может наблюдаться и летом. В целом же, во время весеннего и летнего периода, выпадения и таяния снега и мерзлоты когерентность понижается до 0.1- 0.2. Съемки тундровых участков летом возможны только при проведении съемок с короткими интервалами между съемками.

- для пустыни максимальные значения когерентности наблюдаются летом и зимой и составляют в среднем 0.4 - 0.6. Пустынные области пригодны для интерферометрических наблюдений практически в любое время года, однако важно проведение съемок в одинаковых метеоусловиях в смысле влажности подстилающих покровов. Предпочтительными являются съемки в сухие дни.

#### Учет влияния снежного покрова

Выпадение снежного покрова за время между интерферометрическими съемками – источник ошибок измерения высот [ 3 ]. Диэлектрическая проницаемость снега отличается от диэлектрической проницаемости воздуха, вследствие чего слой снега, выпавшего за время между наблюдениями земной поверхности, приводит к увеличению длины пути сигнала по сравнению с оптической длиной, что может приводить к значительным ошибкам в оценке высоты рельефа. Решением проблемы влияния снежного покрова является проведение съемок в бесснежную погоду или на временном интервале, в течение которого не наблюдалось выпадение снега. Холодное время года с минусовыми температурами воздуха предпочтительно для классических методов интерферометрии.

#### Выбор углов падения зондирующего сигнала для минимизации теней и эффектов «переналожения» вершин и подножий склонов

Выбор оптимальных значений углов падения зондирующего сигнала ставит целью:

- исключение (минимизацию) радиолокационных теней на сюжетно важной части изображения;

- исключение (минимизацию) на сюжетно важной части изображения эффекта «переналожений» вершины и подножия склона, образующегося из-за того, что радиосигнал достигает вершины склона раньше, чем его подножия, вследствие чего подножие склона воспроизводится на радиолокационном изображении (РЛИ) как более дальняя область от радиолокатора по сравнению с вершиной склона.

Геометрия формирования радиолокационной тени и эффекта «переналожения» вершин и подножий склонов на РЛИ представлена на рисунках 1, 2.

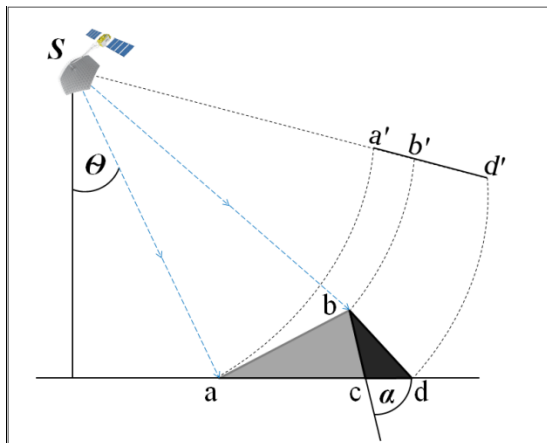


Рис.1. Геометрия формирования на РЛИ радиолокационной тени.

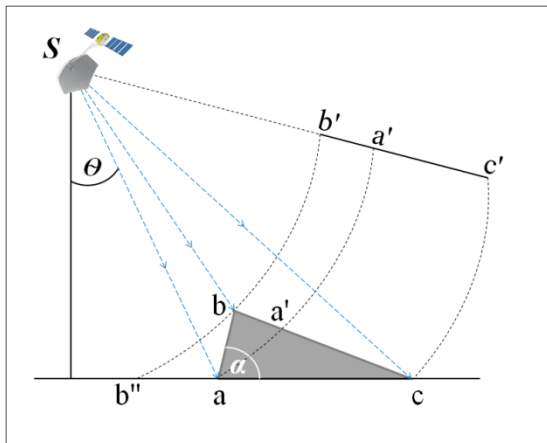


Рис.2. Геометрия формирования на РЛИ эффекта «переналожения» вершин и подножий склонов.

Для выбора условий оптимального воспроизведения на РЛИ горных участков необходимо знать угол уклона местности.

Углом уклона местности будем считать угол  $\alpha$  между плоскостью, перпендикулярной к местной вертикали и плоскостью, касательной к земной поверхности в точке падения зондирующего сигнала (рис.1, 2).

Также углом падения зондирующего сигнала будем считать угол  $\theta$  между местной вертикалью и линией, проходящей через точку падения зондирующего сигнала и точку съемки S. (рис.1, 2).

Тогда, для обеспечения условий исключения (минимизации) радиолокационных теней на изображении и эффектов «переналожения» вершины и подножия склона должны выполняться, соответственно, два неравенства:

$$\alpha \leq \pi/2 - \theta \quad (1)$$

$$\alpha \leq \theta \quad (2)$$

Если по каким либо причинам одновременное выполнение неравенств (1), (2) не представляется возможным, приоритет их выполнения при выборе угла падения зондирующего сигнала  $\theta$  следует обеспечивать на основании анализа сюжетно важной части снимка.

Одновременно, выбор углов падения зондирующего сигнала осуществляется в диапазоне, обусловленном геометрией наблюдения:

$$\theta_{\min} \leq \theta_{\text{м}} \leq \theta_{\max} \quad (3)$$

где  $\theta_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$ , - соответственно минимальный и максимальный углы падения зондирующего сигнала, обеспечиваемые КА РЛН.

Учет величин параметра неоднозначности по высоте и интерферометрической базы при выборе угла падения зондирующего сигнала не осуществляется. Порядок их выбора описывается ниже на основании анализа характеристик рельефа.

Азимут съемки определяется на основании анализа условий оптимального воспроизведения на сюжетно важной части РЛИ при заданном угле падения зондирующего сигнала радиолокационных теней, прямых склонов и других элементов сюжета.

#### Выбор углов падения зондирующего сигнала для съемки районов с низким обратным рассеиванием.

Съемку районов с низким обратным рассеиванием (равнинные области, покрытые песком или снегом) целесообразно проводить при меньших углах падения зондирующего сигнала с тем, чтобы обеспечить достаточно высокую когерентность благодаря повышению уровня отражения [ 4 ].

#### Выбор углов падения зондирующего сигнала для съемки урбанизированных районов

Съемку урбанизированных территорий и объектов промышленной инфраструктуры целесообразно проводить при малых углах падения зондирующего сигнала, чтобы

минимизировать геометрические искажения, обусловленные эффектом «переналожения» высоких объектов.

Съемка при больших углах падения зондирующего сигнала нежелательна, поскольку возникают существенные искажения высотных объектов, сигнал от верхней части которых располагается в стороне от основания объекта и суммируется с сигналами других, более близких объектов (эффект «переналожения»). Искажения подобного рода практически не поддаются устранению.

Но при малых углах падения зондирующего сигнала почти за всеми высотными объектами образуются значительные радиолокационные тени. Данная проблема может быть решена с помощью повторной съемки данного района с другим азимутом.

#### Определение оптимальных значений поперечной базы и неоднозначности по высоте

Определение оптимальных значений поперечной базы  $l_p$  и параметра неоднозначности по высоте  $h_N$  осуществляется на начальном этапе планирования интерферометрической съемки при выбранных ранее углах падения зондирующего сигнала и азимута съемки из условия обеспечения заданной точности ЦМР и качества интерферограммы.

Неоднозначность по высоте  $h_N$  является важным параметром интерферометра, определяющим перепад высоты, при котором фаза в интерферограмме изменяется на величину  $2\pi$ .

Выбор величины неоднозначности по высоте осуществляется в диапазоне, обеспечивающем, с одной стороны, воспроизведение интерферограммы без искажений при заданных углах уклонов местности  $\alpha$  и, с другой стороны, заданную точность формирования ЦМР.

Выбор верхней границы диапазона значений неоднозначности по высоте осуществляется исходя из обеспечения формирования качественной интерферограммы. Известно, что если проводить съемку с небольшими значениями параметра неоднозначности по высоте при наличии на снимаемых участках местности крутых уклонов, то интерференционные линии в интерферограмме будут сливаться, делая ее обработку затруднительной или вообще невозможной.

Для нормального воспроизведения интерферограммы в соответствии с теоремой Котельникова на интервал изменения фазы на величину  $2\pi$  должно приходиться не менее двух отсчетов интерферограммы  $\Delta x$  в горизонтальной плоскости, С учетом сказанного, нижняя граница диапазона значений неоднозначности по высоте определяется неравенством:

$$h_N \geq 2\Delta x \operatorname{tg}(\alpha) \quad (4)$$

С учетом выражения для величины неоднозначности по высоте [1,2,5]:

$$h_N = \lambda r \operatorname{tg}(\beta) / (2l_p) \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  
 $r$  – наклонная дальность;  
 $\beta$  – угол визирования,  
 $l_p$  – величина поперечной интерферометрической базы,

получаем выражение для верхней границы диапазона значений поперечной интерферометрической базы,

$$l_p \leq \lambda r \operatorname{tg}(\beta) / (4\Delta x \operatorname{tg}(\alpha)) \quad (6)$$

Выбор нижней границы диапазона значений неоднозначности по высоте осуществляется исходя из требований по точности формируемой ЦМР.

Зависимость СКО оценки высоты  $\sigma_h$  от СКО фазового шума  $\sigma_\varphi$  и параметра неоднозначности  $h_N$  по высоте определяется выражением [1,2,5]:

$$\sigma_h = h_N \frac{\sigma_\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda r \operatorname{tg}(\beta)}{4\pi l_p} \sigma_\varphi \quad (7)$$

Для обеспечения необходимой точности по высоте должно выполняться неравенство:

$$\sigma_h = h_N \frac{\sigma_\varphi}{2\pi} \leq \sigma_{h_{max}} \quad (8)$$

где  $\sigma_{h_{max}}$  – максимальное значение СКО по высоте.

В свою очередь, СКО фазового шума зависит от коэффициента когерентности  $\gamma$  и количества некогерентных накоплений  $N$  и при  $N \geq 4$  определяется выражением [6]:

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1 - |\gamma|^2}}{|\gamma|} \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) для верхней границы диапазона значений неопределенности по высоте получаем:

$$h_N \leq \frac{2\pi \sqrt{2N} \sigma_{h_{max}} |\gamma|}{\sqrt{1 - |\gamma|^2}} \quad (10)$$

Таким образом, для обеспечения качества воспроизведения интерферограммы и достижения требуемой точности формирования ЦМР параметр неоднозначности по высоте должен находиться в диапазоне, определяемом выражением:

$$2\Delta x \operatorname{tg}(\alpha) \leq h_N \leq \frac{2\pi \sqrt{2N} \sigma_{h_{max}} |\gamma|}{\sqrt{1-|\gamma|^2}} \quad (11)$$

Выражению (11) соответствует выражение, определяющее диапазон значений поперечной базы интерферометра:

$$\frac{\lambda H \operatorname{tg}(\beta) \sqrt{1-|\gamma|^2}}{4\pi \sqrt{2N} \sigma_{h_{max}} |\gamma| \cos(\beta)} \leq l_p \leq \frac{\lambda H \operatorname{tg}(\beta)}{(4\Delta x \operatorname{tg}(\alpha)) \cos(\beta)} \quad (12)$$

Выбор углов падения зондирующего сигнала и оптимального значения поперечной базы с целью устранения объемной декорреляции

Наличие в пределах одного элемента разрешения РЛИ множества элементарных отражателей, расположенных на разной высоте, приводят к «объемной декорреляции» сигналов, пришедших с различающихся углов. В этом случае интерферометрическую съемку целесообразно проводить при небольших поперечных базах. Тогда обеспечивается увеличение параметра высоты неоднозначности и, как следствие, рост когерентности сигналов интерферометрической пары снимков [7]. Указанные условия актуальны при съемке территорий, покрытых лесными массивами.

### Список литературы

#### Статьи из журналов и сборников

1. А.И.Захаров, Л.Н.Захарова, В.М.Леонов, Требования к точности позиционирования космического интерферометрического РСА при построении высокоточных цифровых моделей рельефа, Космонавтика и ракетостроение, 2015
2. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Леонов В.М. Сорочинский М.В., Влияние радиотехнических шумов аппаратуры РСА на точность измерения рельефа методами радарной интерферометрии// Космонавтика и Ракетостроение, № 6 (91), 2016, с. 132-139.
3. А.И. Захаров, Л.Н. Захарова, Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона// // ж. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Т. 14. №7. с. 190-197. 2017.
4. П.В. Денисов, А.И. Захаров, А.С. Мартянов, К.А. Трошко. Исследование интерферометрической когерентности в зависимости от интервала между радарными съёмками на примере данных X диапазона// VIII Всероссийские Армандовские чтения, Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 246-251.
5. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Леонов В.М., Требования к навигационному обеспечению космического интерферометрического РСА для построения высокоточных цифровых моделей рельефа// Космонавтика и ракетостроение, 2015, №6, С. 71-76.
6. E.Rodriguez, J.M.Martin, Theory and design of interferometric synthetic aperture radars// IEEE Proc. of Radar and Signal Processing. – 1992. – Vol. 139. – No. 2. – P. 147-159.
7. Martone, M. ; Brautigam, B. ; Krieger, G. Decorrelation effects in bistatic TanDEM-X data //Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6352346 Page(s): 5558 – 5561.