

# МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ОДНОПРОХОДНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*Лобан М.А., магистрант гр.145241*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Козлов С.В. – доктор технических наук*

**Аннотация.** Приведена методика оптимизации параметров радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии при решении задач оперативного оценивания рельефа подстилающей поверхности. Рассмотрены основные параметры функционирования радиолокатора космического базирования и их ограничения.

**Ключевые слова.** радиолокатор с синтезированием апертуры, однопроходной режим, интерферометрическая обработка, радиолокационное изображение, космический аппарат.

## **Введение**

Одной из тенденций развития радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования (КБ) является широкое применение интерферометрической обработки для получения цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) и измерения высот размещенных на местности объектов [1].

Наибольшее распространение получили интерферометрическая обработка с использованием разделения общей апертуры на две субапертуры с разнесенными фазовыми центрами для селекции движущихся объектов [2] и многопроходная интерферометрия – обработка двух и более комплексных радиолокационных изображений (РЛИ), полученных при съемке одного и того же участка местности на различных витках орбиты космического аппарата (КА) с разнесением во времени от нескольких суток до нескольких месяцев с получением высот элементов разрешения земной поверхности и размещенных на ней объектов. Второй вариант используется для обнаружения сдвигов земной поверхности при наличии стабильных отражателей с субмиллиметровой точностью [3].

Рассматриваемый метод позволяет оперативно решать задачи по:

- построению ЦМР и ЦММ земной поверхности с значением среднеквадратического отклонения определения высот единицы метров;
- контролю состояния техногенных объектов (здания, трубопроводы, мосты и т.д.);
- мониторингу смещений и деформаций земной поверхности в районе горных выработок, сейсмической и вулканической активности, таяния вечной мерзлоты и т.д.;
- наблюдением за таянием ледников, гидрология в отдаленных и горных районах [5].

Геометрия наблюдения за поверхностью в случае однопроходной интерферометрической съемки для РСА космического базирования изображена на рисунке 1 [10].

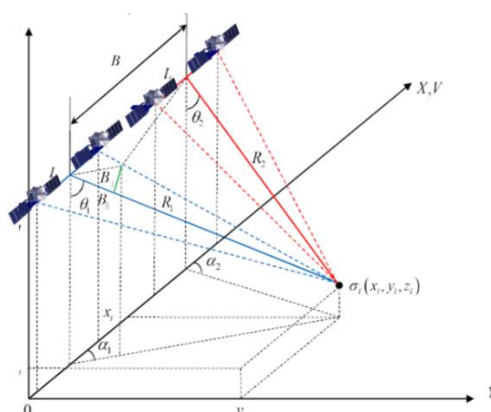


Рисунок 1 – Геометрия наблюдения при однопроходной интерферометрической съемке

Оценивание высот и отображение сдвигов происходит за счет измерения интерферометрической разности фаз (ИРФ) комплексных РЛИ, полученных в различные моменты времени [4]. Пример рельефа местности и соответствующей ИРФ представлен на рисунке 2.

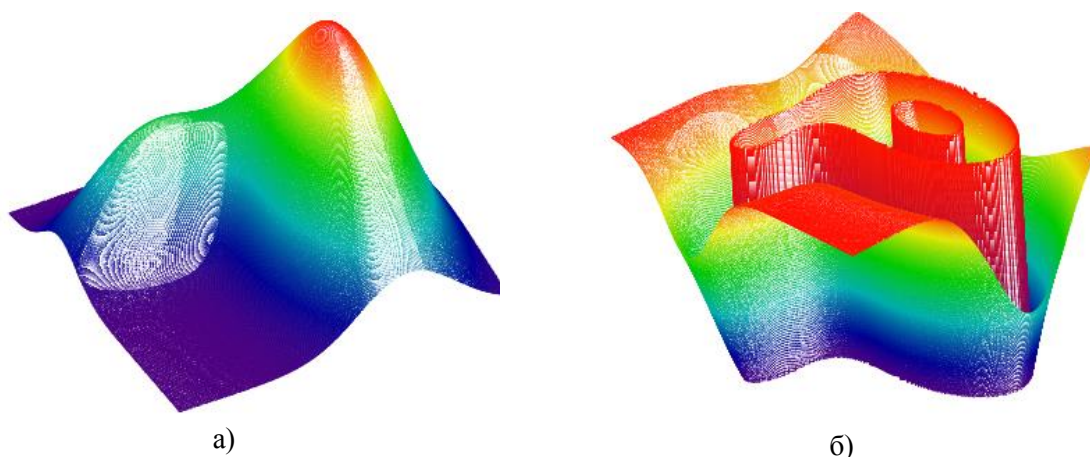


Рисунок 2 – Пример рельефа местности (а) и соответствующей ИРФ (б)

Основным недостатком способа многопроходной интерферометрии является большое (от нескольких суток до нескольких недель) время выдачи информации. Это обуславливает возрастание интереса к однопроходной интерферометрии, когда ИРФ вычисляется на основе пары РЛИ, полученных на одном витке при последовательном наблюдении радиолокационной сцены при близких значениях ракурса наблюдения. Вопросы однопроходной интерферометрии при решении задач оперативного оценивания рельефа подстилающей поверхности применительно к РСА авиационного базирования рассматривались в работах [5,6,7]. Показана соизмеримость точности оценки высот с использованием одно- и многопроходной интерферометрии и установлено существование оптимальной базы при однопроходной интерферометрической обработке. Отдельным преимуществом однопроходной интерферометрии является упрощение разворачивания фазы при устранении неоднозначности (unwrapping of phase), что может быть достигнуто за счет использования многошкальной обработки.

Основной особенностью РСА космического базирования, в отличие от авиационного, является крайне ограниченный сектор сканирования главного лепестка диаграммы направленности антенны (луча) в азимутальной плоскости. Например, для РСА TerraSAR-X и многих других типов РСА угол сканирования по азимуту не превышает  $\pm 0,75^\circ$  [8]. Следовательно, реализовать рекомендуемое согласно [9,10] время наблюдение при заданной базе не представляется возможным. Поэтому результаты [9,10] требуют уточнения с учетом ограничений, обусловленных спецификой РСА космического базирования, что и определяет цель настоящей статьи.

#### Методика оптимизации параметров функционирования

Традиционные способы функционирования РСА КБ в маршрутном режиме предполагают реализацию бокового обзора, когда угол  $\alpha$  между вектором скорости КА и направлением

наблюдения в горизонтальной плоскости составляет  $\alpha_0 = 90^\circ$ . При реализации детального режима угол  $\alpha$  за счет электронного управления лучом изменяется в диапазоне от  $90^\circ - \alpha_{\max}$  до  $90^\circ + \alpha_{\max}$ , где  $\alpha_{\max}$  - максимальный угол отклонения луча от нормали к плоскости антенной системы в азимутальной плоскости,  $\alpha_{\max} \approx 0,75^\circ$ .

Для получения отличной от нуля ИРФ необходимо, чтобы на интервале наблюдения среднее значение угла наблюдения  $\alpha \neq 90^\circ$ . Это может быть достигнуто поворотом корпуса КА с установленной антенной системой в горизонтальной плоскости. С учетом ограничений на затраты топлива на поворот КА будем полагать, что угол  $\alpha$  может находиться в диапазоне  $\alpha = 45^\circ \dots 80^\circ$ .

Отметим, что с учетом необходимости разворота КА в плоскости курса необходима реализация новых для РСА КБ способов обработки сигналов при переднебоковом обзоре. С учетом большой скорости КА, высокого разрешения по наклонной дальности и большого времени синтеза реализация указанных способов обработки предполагает учет высших производных дальности между фазовым центром антенны РСА и участком земной поверхности с реализацией компенсации миграции дальности и частоты, например, экономичных алгоритмов в спектральной области, приведенных в [10].

Получим аналитические соотношения, связывающие пространственные условия наблюдения, ограничения на сектор электронного сканирования в азимутальной плоскости, характеристики декорреляции отраженного сигнала, с одной стороны, и достижимую среднюю квадратическую ошибку определения высоты, с другой стороны. Для этого запишем разность расстояний до центра наблюдаемой сцены при построении двух последовательно получаемых комплексных РЛИ

$$\Delta = 2\sqrt{H^2 \cdot \tan^2(\theta) \cdot \sin^2(\alpha_1) + H^2 \cdot \tan^2(\theta) \cdot \cos^2(\alpha_1) + (H - z)^2} - 2\sqrt{H^2 \cdot \tan^2(\theta) \cdot \sin^2(\alpha_1) + (H \cdot \tan(\theta) \cdot \cos(\alpha_1) - B)^2 + (H - z)^2}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота орбиты КА;  $\theta$  – угол отклонения от надира;  $\alpha_1 = \alpha - \alpha_{\max}$  – угол наблюдения в азимутальной плоскости в момент начала съемки;  $B$  – база интерферометрической съемки;  $z$  – высота отражателя в элементе разрешения.

При записи (1) считалось, что в начальный момент времени КА находится в точке с координатами  $x = y = 0$ ;  $z = H$ , а вектор его скорости направлен по оси Оу декартовой системы координат.

В отличие от [9,10] для определения чувствительности измерения высот к ошибкам измерения ИРФ вычислим производную (1) по высоте отражателя  $z$  в точке  $z=0$ :

$$\left. \frac{\partial \Delta}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{2(H - z)}{\sqrt{H^2 \tan^2(\theta) \cdot \sin^2(\alpha) + H^2 \tan^2(\theta) \cdot \cos^2(\alpha) + (H - z)^2}} + \frac{2(H - z)}{\sqrt{H^2 \tan^2(\theta) \cdot \sin^2(\alpha) + (H \tan(\theta) \cdot \cos(\alpha) - B)^2 + (H - z)^2}}. \quad (2)$$

Тогда средняя квадратическая ошибка (СКО) измерения высоты может быть представлена в виде

$$\sigma_z = \left. \frac{\partial z}{\partial \Delta} \right|_{z=0} \frac{\lambda}{2\pi} \sigma_\varphi, \quad (3)$$

где  $\sigma_\varphi$  – СКО оценки ИРФ;  $\lambda$  – длина волны РСА.

Как показано в [9], СКО оценивания фазы определяется как

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{2}\gamma}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент корреляции сигнала в элементе разрешения на РЛИ, величина которого определяется декорреляцией сигнала за счет пространственного разнесения антенн в разные моменты времени и отношением сигнал/шум  $\rho$  на РЛИ [2, 9].

Для статистически однородной шероховатой земной поверхности коэффициент корреляции будет определять как [9]

$$\gamma = \left[ 1 - \frac{2B \cos \alpha \cos \theta}{\lambda R \tan \theta} \cdot \Delta r \right] \cdot \exp \left[ -2\pi^2 \left( \frac{\sigma_h B \cos \alpha \cdot \cos \theta}{\lambda R \sin \theta} \right)^2 \right] \cdot \frac{\rho}{1+\rho} \times \left( 1 - \frac{2\Delta x \cdot \sin \theta}{\lambda} \left| \arctan \left[ \frac{B \sin \alpha}{H \operatorname{tg} \theta - B \cos \alpha} \right] \right| \right); \quad (5)$$

где  $\sigma_h$  – среднеквадратическое отклонение высот отражающих элементов для шероховатой земной поверхности,  $\Delta r$  – разрешающая способность по наклонной дальности;  $\Delta x$  – разрешающая способность по поперечной дальности;  $\rho$  - отношение сигнал/шум на радиолокационном изображении;  $R = H / \cos \theta$  – дальность до центра сцены.

Если решается задача определения высот конструктивных элементов наземных объектов, например, специально устанавливаемых уголкового отражателей [1-3], эффективная площадь рассеяния которых много больше (в сотни раз и более) эффективной площади рассеяния земной поверхности в элементе разрешения PCA, в (5) исключить множители  $\left[ 1 - \frac{2B \cos \alpha \cos \theta}{\lambda R \tan \theta} \cdot \Delta r \right] \cdot \exp \left[ -2\pi^2 \left( \frac{\sigma_h B \cos \alpha \cdot \cos \theta}{\lambda R \sin \theta} \right)^2 \right]$  и  $1 - \frac{2\Delta x \cdot \sin \theta}{\lambda} \left| \arctan \left[ \frac{B \sin \alpha}{H \operatorname{tg} \theta - B \cos \alpha} \right] \right|$ , определяемые, соответственно, пространственной и разноракурсной декорреляцией отраженного сигнала при синтезировании апертуры.

Параметры  $\Delta x$  и  $\rho$  определяются временем синтезирования при построении РЛИ. Найдем время синтезирования с учетом ограничений на угол отклонения луча в азимутальной плоскости.

Максимальное время наблюдения сцены, которое достигалось бы в детальном режиме при полном использовании сектора сканирования в азимутальной плоскости:

$$T_{\max} = \frac{2\alpha_{\max} H \cdot \operatorname{tg} \theta}{V \sin \alpha}, \quad (6)$$

где  $V \sin(\alpha)$  – тангенциальная скорость КА относительно центра сцены.

С учетом необходимости построения при однопроходной интерферометрии минимум двух РЛИ с базой между ними  $B$  время синтезирования можно записать в виде

$$T_c = T_{\max} - \frac{B}{V}. \quad (7)$$

Тогда разрешающая способность по поперечной дальности

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{2T_C V \sin \alpha} = \frac{\lambda R}{2(2\alpha_{\max} H \operatorname{tg} \theta - B \sin \alpha)}. \quad (8)$$

Пусть при времени синтезирования  $T_{\max}$  отношение сигнал/шум на РЛИ равно  $\rho_{\max}$ . При времени синтезирования  $T_C < T_{\max}$  применительно к земной поверхности будет происходить два процесса: величина элемента разрешения по поперечной дальности будет увеличиваться обратно пропорционально  $T_C$ , но число когерентно накапливаемых импульсов будет уменьшаться пропорционально уменьшению времени синтезирования. Следовательно, для земной поверхности отношение сигнал/шум на радиолокационном изображении не зависит от базы синтезирования и  $\rho = \rho_{\max}$ . Для точечного отражателя с геометрическими размерами, много меньше размеров элемента разрешения по продольной и поперечной дальности будет происходить только уменьшение энергии накопленного сигнала. Следовательно,  $\rho(B) = \rho_{\max} \left(1 - \frac{B}{T_{\max} V}\right)$ . Обобщая, запишем:

$$\rho(B) = \begin{cases} \rho_{\max}, & \text{для земной поверхности;} \\ \rho_{\max} \left(1 - \frac{B}{T_{\max} V}\right), & \text{для точечного отражателя.} \end{cases} \quad (9)$$

СКО измерения высоты составит

$$\sigma_z = \left( \frac{\partial \Delta}{\partial z} \Big|_{z=0} \right)^{-1} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{2}\gamma}. \quad (10)$$

где  $\gamma$  определяется (5) с учетом (8) и (9).

Величина  $\sigma_z$  является функцией угла отклонения корпуса КА в азимутальной плоскости, высоты орбиты КА и угла отклонения от надира посредством (2), разрешающей способности по наклонной дальности  $\Delta r$ , максимального угла отклонения луча в азимутальной плоскости посредством (6)-(8) и (5) и энергетических параметров радиолокатора через отношение сигнал/шум. Определяющее значение, аналогично РСА авиационного базирования [3,9], будет оказывать база  $B$  интерферометрической съемки. Оптимальное  $B_{\text{опт}}$  значение базы интерферометрической съемки при заданных технических параметрах РСА с учетом ограничений на угол отклонения луча в азимутальной плоскости:

$$B_{\text{опт}} = \operatorname{argmin}_B \sigma_z(B). \quad (10)$$

Вычисляя зависимость  $\sigma_z$  от как функцию базы интерферометрической обработки можно установить наличие и величину оптимальной базы, а также соответствующие значения времени синтезирования и потенциально достижимое СКО оценивания высоты.

### Заключение

Предлагаемая методика может быть полезна при оптимизации параметров и исследовании эффективности радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования с учетом характерных для него ограничений в режиме однопроходной интерферометрии.

#### Список использованных источников:

1. Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020; 4(2):198-233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.
2. Madsen S.N., Zebker H.A. *Imaging radar interferometry. Principles & Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing*. Vol. 2. New York: Wiley, 1998. 866 p.
3. Massonnet D., Feigl K.L. *Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // Review of Geophysics*. 1998. Vol. 4. P. 441–500.
4. C.V. Jakowatz. *Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996. 430 p.

5. Richards M.A. *A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing // IEEE A&E systems magazine. Part 3: Tutorials – Richards. 2006. Vol. 21, N 6. P. 5–29.*
6. Ouchi K. *Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. Vol. 5, N 2. P. 716–807.*
7. Pepe A., Calo F. *A review of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, N 12. Paper 1264.*
8. *Космические PCA третьего поколения TerraSAR-X, 2011. URL: <http://terraview.ru/articles/11/terra-sar-x>.*
9. Шимкин П. Е., Бабокин М.И., Баскаков А.И. *Исследование точности однопроходного переднебокового PCA интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. №5. С. 103-112.*
10. Козлов С.В., Ле В.К. *Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области. Доклады БГУИР. 2021;19(5):35-44.*

UDC 621.396

## METHODOLOGY FOR OPTIMIZING RADAR PARAMETERS WITH SPACE-BASED APERTURE SYNTHESIS IN SINGLE-PASS INTERFEROMETRY MODE

Loban M.A.<sup>1</sup>

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Kozlov S.V. - Doctor of Technical Sciences*

**Annotation.** A technique for optimizing the parameters of a radar with the synthesis of a space-based aperture in the mode of single-pass interferometry is presented when solving problems of operational assessment of the relief of the underlying surface. The main parameters of the functioning of a space-based radar and their limitations are considered.

**Keywords.** radar with aperture synthesis, single-pass mode, interferometric processing, radar image, spacecraft.