

УДК 629.7.058.54:520.872

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОСМИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ В РЕЖИМЕ ОДНОПРОХОДНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

КОЗЛОВ С. В. ЛОБАН М. А.

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

Аннотация. Применительно к радиолокатору с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования (КБ) предложен экономичный способ оценивания высот элементов земной поверхности с расположенными на ней объектами при однопроходной интерферометрии. Способ предполагает получение траекторного сигнала при угле между вектором скорости и направлением наблюдения $30...80^\circ$ в течении максимально возможного для радиолокатора времени, определение оптимальных времени и базы синтезирования, построение радиолокационных изображений (РЛИ) заданного участка земной поверхности для 3-4 значений базы синтезирования до максимально возможной при оптимальном времени синтезирования, причем минимальное значение базы определяется условиями однозначного измерения высоты элементов земной поверхности, и последовательном устранении неоднозначности фазовых измерений по последовательности синтезированных РЛИ. Приведены результаты моделирования предлагаемого способа.

Аннотация. As applied to a radar with space-based aperture synthesis, an economical method for estimating the heights of the elements of the earth's surface with objects located on it using single-pass interferometry is proposed. The method involves obtaining a trajectory signal at an angle between the velocity vector and the direction of observation of $30 \dots 80^\circ$ for the maximum possible time for the radar, determining the optimal time and synthesis base, building radar images (RI) of a given area of the earth's surface for 3-4 values of the synthesis base up to the maximum possible at the optimal synthesis time, and the minimum value of the base is determined by the conditions for unambiguous measurement of the height of the elements of the earth's surface, and the sequential elimination of the ambiguity of phase measurements in the sequence of synthesized radar images. The simulation results are presented.

Постановка задачи

Одним из перспективных режимов функционирования радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования может являться режим однопроходной интерферометрии [1,2]. Указанный режим позволяет оперативно, за один виток космического аппарата (КА), решать задачи по построению цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности со значением среднеквадратического отклонения определения высот единицы метров, контролировать состояние техногенных объектов (здания, трубопроводы, мосты и т.д.), выполнять мониторинг смещений и деформаций земной поверхности в районе горных выработок, сейсмической и вулканической активности, таяния вечной мерзлоты, наблюдать за таянием ледников, гидрологией в отдаленных и горных районах и т.д. [1,3,6].

При реализации указанного режима необходимо обеспечить отличный от 90° угол между вектором скорости КА и направлением наблюдения в горизонтальной плоскости. Для существующих РСА КБ имеющих ограниченный (единицы градусов) сектор сканирования в азимутальной плоскости [3] это достигается поворотом корпуса космического аппарата, для перспективных РСА КБ, где указанное ограничение за счет изменения конструкции антенны может быть снято, это достигается отклонением луча на $30...45^\circ$ от нормали к антенне в азимутальной плоскости.

В [4,5] приведена методика и результаты оптимизации характеристик РСА КБ в режиме однопроходной интерферометрии. Показано, что оптимальное значение интерферометрической базы $B_{\text{опт}}$ определяется геометрией наблюдения (высотой полета РСА, углами наблюдения в вертикальной и горизонтальной плоскости), длиной волны и степенью угловой декорреляции отраженного сигнала. Оптимальное значение времени синтезирования $T_{\text{опт}} = T_{\text{max}} - B_{\text{опт}} / V$, где

$T_{\max} = 1,0 \dots 1,5$ с – максимальное возможное для РСА КБ время синтезирования; $V = 7,5 \dots 7,7$ км/с - орбитальная скорость КА в зависимости от высоты при $B_{\text{опт}} = 1,5 \dots 3,5$ км при определении высот элементов разрешения шероховатой земной поверхности и $B_{\text{опт}} = 3,0 \dots 5,0$ км при определении высоты стабильного отражателя.

Вместе с тем, результаты [4] определяют потенциальные возможности режима однопроходной интерферометрии, не раскрывая технологию проведения измерений. Цель статьи – устранение указанного пробела.

Содержание обработки

Геометрия наблюдения при однопроходной интерферометрической съемке приведена на рисунке 1. Космический аппарат движется на высоте H со скоростью V направленной по оси Oy декартовой системы координат. Центр наблюдаемой радиолокационной сцены находится в точке (x, y, z) декартовой системы координат (при $z=0$). Угол отклонения луча от надира (в вертикальной плоскости) составляет $\theta_1 \approx \theta_2$, в горизонтальной плоскости угол изменяется в пределах $\alpha_1 \dots \alpha_2$, причем $|\alpha_1 - \alpha_2| \approx 2\alpha_{\max}$, где α_{\max} - максимальный угол отклонения луча от нормали к плоскости антенной системы в азимутальной плоскости при типовом значении $\alpha_{\max} \approx 0,75^\circ$ [3].

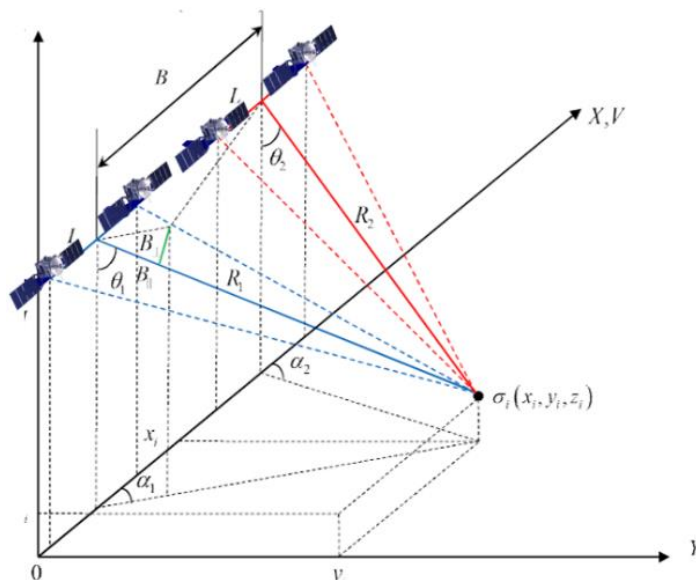


Рис. 1. Геометрия наблюдения при однопроходной интерферометрической съемке

Разность хода электромагнитной волны до заданной точки на радиолокационной сцене при построении двух последовательно получаемых комплексных РЛИ составит

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

Доступной для наблюдения при совмещении пары РЛИ, полученных с базой B , является оценка $\delta\varphi$ интерферометрической разности фаз для элементов (разрешаемых участков) земной поверхности

$$\delta\varphi = \arg \frac{\dot{Z}_1(x, y)}{\dot{Z}_2(x, y)}, \quad (2)$$

где $\dot{Z}_{1(2)}(x, y)$ - отсчеты первого и второго комплексного РЛИ в точке (x, y) .

При двухпроходной интерферометрии [1,6] далее проводится трудоемкая операция развертывания интерферометрической фазы (unwrapping of phase) фазы и определение высот участков земной поверхности.

Математическое ожидание интерферометрической разности фаз

$$\delta\varphi = 2\pi \left\{ \frac{\Delta(B, z)}{\lambda} \right\}, \quad (3)$$

где $\{x\}$ - дробная часть числа; λ - длина волны.

На рисунке 2 приведена зависимость интерферометрической разности фаз (3) от высоты элемента земной поверхности, построенная при типовых для РСА КБ параметрах $B \approx B_{\text{опт}} = 3$ км; $H = 500$ км; $\theta_1 \approx \theta_2 = 30^\circ$; $\alpha_1 = 29,25^\circ$; $\alpha_2 = 30,75^\circ$; $V = 7,5$ км/с; времени синтезирования $T_c = 1,6$ с; времени наблюдения радиолокационной сцены $T_{\text{max}} = 2,0$ с. В данном случае на интервале наблюдения 2 с имеем два пересекающихся участка синтезирования по $T_c = 1,6$ с.

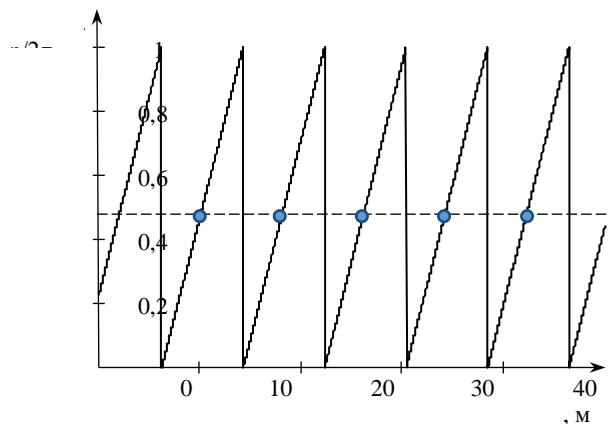


Рис. 2. Зависимость разности фаз от высоты элемента земной поверхности при $B=3$ км

Как следует из рисунка 2, оценка высоты элемента земной поверхности по измеренной разности фаз $\delta\varphi$ характеризуется классической фазовой неоднозначностью. Разрешить фазовую неоднозначность можно переходом к многошкальной обработке, аналогично фазовым пеленгаторам или аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых системы при фазовых измерениях [7].

Используем на указанном интервале наблюдения $T_{\text{max}} = 2,0$ с дополнительные интервалы синтезирования при одном и том же времени синтезирования $T_c = 1,6$ с, что необходимо для получения одинакового разрешения на всех РЛИ, взяв, например, значения интерферометрической базы $B = 500$ м; 1000 м; 2000 м. Временные соотношения для указанного случая приведены на рисунке 3, где толстыми линиями показаны участки синтезирования для различных значений интерферометрической базы. Зависимости интерферометрической разности фаз для указанных условий приведены на рисунке 4.

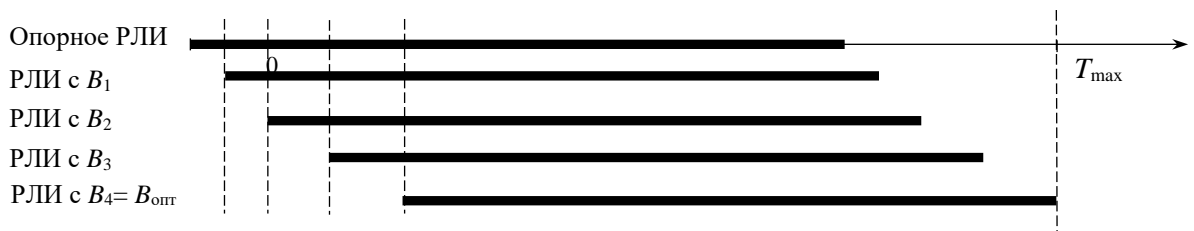


Рис. 3. К выбору участков синтезирования для различных значений интерферометрических баз

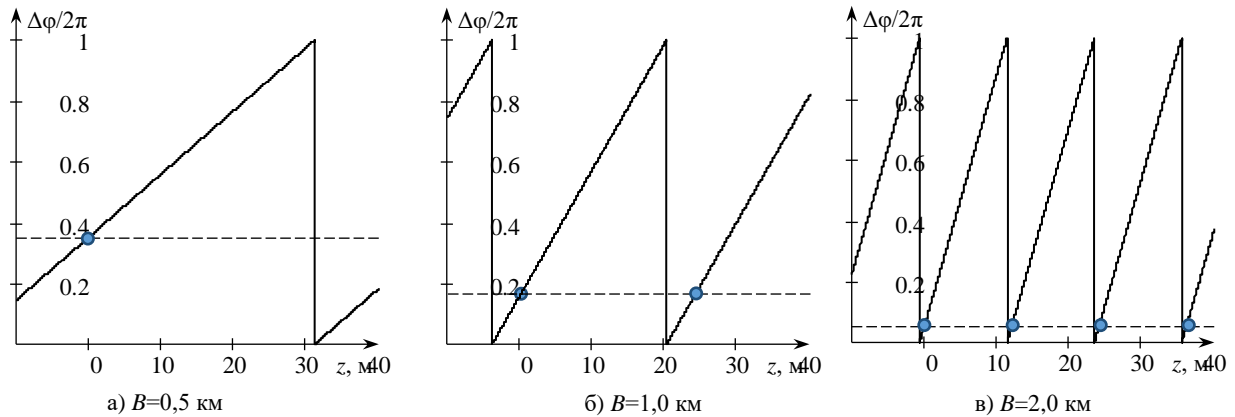


Рис. 4. Зависимость разности фаз от высоты элемента земной поверхности для различных значений интерферометрической базы B

Пунктирными горизонтальными линиями на рисунках 2 и 4 показаны значения истинной разности фаз для $z=10$ м, а кружками – соответствующие измерения высот. Как видно из приведенных на рисунке 4 зависимостей, использование разных значений интерферометрической базы позволяет разрешить фазовую неоднозначность. При $B=0,5$ км неоднозначность в заданном диапазоне изменения высот отсутствует, но точность определения высоты, которая определяется углом наклона зависимости интерферометрической разности фаз от высоты, оказывается низкой. При увеличении базы увеличивается точность измерения высоты, но возникает фазовая неоднозначность. Поэтому рациональный вариант определения высот элементов земной поверхности носит итеративный характер: по построенным для одной и той же реализации траекторного сигнала РЛИ заданного участка земной поверхности для разных баз начиная с малых значениях базы определяется первая оценка высоты \hat{z}_1 , с использованием оценки \hat{z}_1 как начального приближения определяется оценка \hat{z}_2 для увеличенного значения базы и т.д. до величины оптимальной базы. Рациональные значения баз для РСА КБ составляют $B_1=0,4\dots 0,6$ км; $B_2=0,8\dots 1,2$ км; $B_3=B_{\text{опт}}$.

На рисунке 5 приведены зависимости среднеквадратической ошибки определения высоты стабильного отражателя (угловая декорреляция отсутствует) от отношения сигнал/шум на РЛИ для различных значений начального угла между вектором скорости и направлением наблюдения. Зависимости построены путем розыгрыша интерферометрической разности фаз в соответствии с отношением сигнал/шум и воспроизведения алгоритма обработки при четырех значениях баз $B=0,5; 1,0; 2,0$ и $3,0$ км.

Средняя квадратическая ошибка уменьшается пропорционально корню из отношения сигнал/шум. При увеличении угла между вектором скорости КА и направлением наблюдения СКО заметно увеличивается, что соответствует закономерностям в [5].

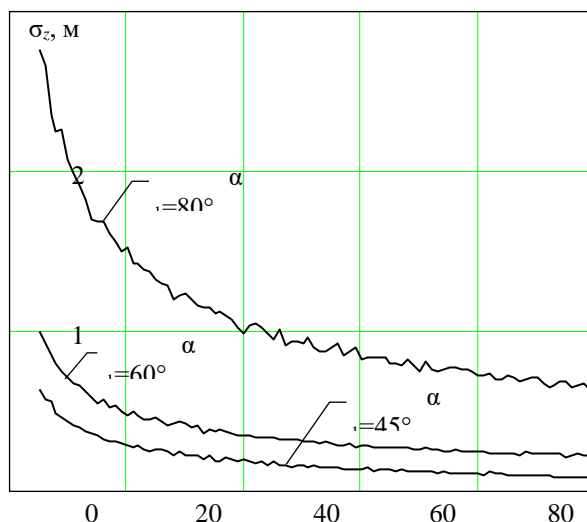


Рис. 5. Зависимости средней квадратической ошибки определения высоты от отношения сигнал/шум

Результаты моделирования и их обсуждение

Работоспособность предлагаемого способа проверялась с использованием имитационной модели – цифрового двойника радиолокатора с синтезированием апертуры. Рассматривался случай локации участка местности в детальном режиме. На участке местности были расположены три локальных отражателя на разных высотах 5; 8 и 12 метров. Принимались следующие параметры наблюдения: $H=500$ км; $\alpha_1=80^\circ$; $\theta=54^\circ$; $V=7,6$ км/с; ЭПР всех отражателей принималась одинаковой при отношении сигнал/шум 15 дБ, местность в окрестности отражателей считалась не отражающей; время синтезирования 1 с.

Формируемые РЛИ при интерферометрической базе $B=3$ км приведены на рисунке 6. Размер формируемых РЛИ составляет 400x200 метров. Построение РЛИ осуществлялось с использованием алгоритма *BackProjection*, однако построение изображения осуществлялось не в координатах «наклонная дальность - поперечная дальность», а непосредственно при фокусировке траекторного сигнала в точку с заданными координатами (x, y) при $z=0$ с дискретностью 5 м по обоим координатам. Градуировка горизонтальной и вертикальной оси на рисунке 6 соответствует выбранной дискретности построения РЛИ.

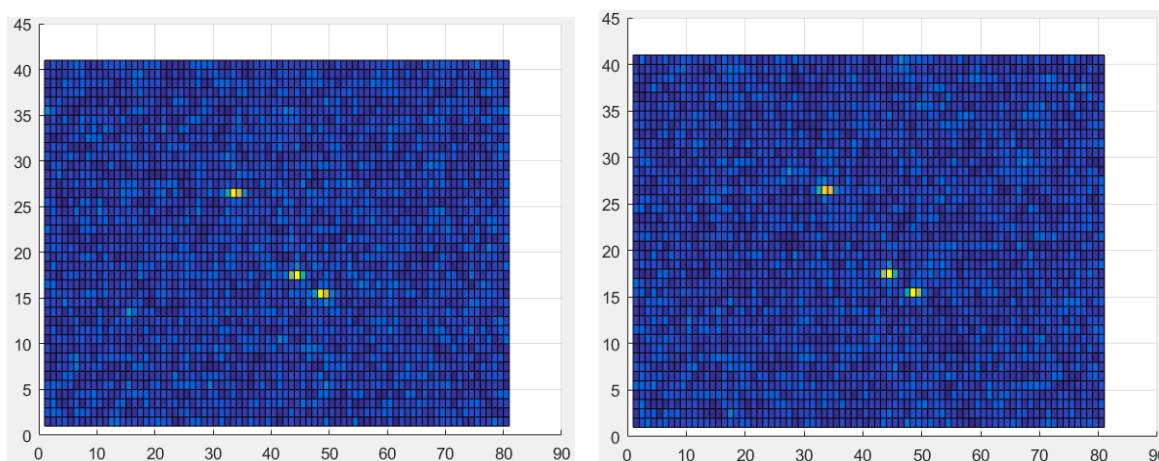


Рис. 6. Формируемые РЛИ для двух участков синтезирования с базой 3 км

Результаты измерения высот локальных отражателей для пяти реализаций приведены в таблице 1. Устранение неоднозначности выполнялось при дополнительной интерферометрической базе 1,0 км.

Таблица 1 – Результаты измерений высот трех локальных отражателей в пяти реализациях

№	Истинные координаты	Координаты на РЛИ	Высота истинная, м	Измеренная высота, м, в реализации				
				1	2	3	4	5
1	(35; 26)	(33; 26)	12	12,5	11,6	12,7	13,1	11,4
2	(45; 17)	(45; 17)	8	9,0	8,4	8,0	7,8	6,7
3	(49; 15)	(48; 15)	5	5,3	5,3	4,6	5,6	5,1

Как видно из приведенных в таблице 1 результатов, математическое ожидание ошибки измерения близко к нулю, точность измерения соответствует значениям, приведенным на рисунке 5.

Заключение

Предлагаемый способ является простым в реализации, не требует развертывания интерферометрической фазы, и может быть использован для оперативной оценки высот участков земной поверхности. Представляет интерес комбинация известного способа двух- или многопроходной интерферометрии и предлагаемого способа в варианте, когда съемка осуществляется под углом $\alpha \neq 90^\circ$. Это позволит грубо оценивать высоты участков земной поверхности однопроходным интерферометрическим методом с последующим использованием полученных оценок высот при двухпроходной 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. Шимкин П. Е., Бабокин М.И., Баскаков А.И. Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. №5. С. 103-112.
3. Космические РСА третьего поколения TerraSAR-X, 2011. URL: <http://terraview.ru/articles/11/terra-sar-x>.
4. Лобан М.А. Оптимизация характеристик и исследование эффективности радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии / И.Н. Давыденко, С/Д/ Козлов С.В., М.А. Лобан М.А., Ле Ван Кыонг // *Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции*, г. Воронеж, 27-29 сентября 2022 г.: в 6 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – Т. 3. – С. 134-141.
5. Лобан М.А. Оценка точности Радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии // *Сборник тезисов докладов 58-й научной конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР*, Минск, 2022.
6. 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.
7. Поваляев А. А. *Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат*. – М.: Радиотехника, 2008. – 356 с.