

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ОДНОПРОХОДНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Лобан М.А., магистрант гр.145241

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – доктор технических наук

Аннотация. Проведена оптимизация времени синтезирования и оптимальной базы радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования (КБ) в режиме однопроходной интерферометрии при решении задач оперативного оценивания рельефа подстилающей поверхности на одном витке орбиты с учетом ограниченного сектора электронного сканирования в азимутальной плоскости. Получены оценки среднеквадратической ошибки (СКО) оценивания высот отражающих элементов с учетом геометрии наблюдения, угла разворота строительной оси КА относительно вектора скорости, ограничений на максимальный угол отклонения луча в азимутальной плоскости.

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

Введение

В [1] рассмотрена методика оптимизации параметров радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии. Показано, что основной особенностью РСА космического базирования, в отличие от авиационного, является ограниченный сектор сканирования главного лепестка диаграммы направленности антенны (луча) в азимутальной плоскости [1]. Это приводит к необходимости разворота КА в плоскости курса, необходимости реализации нового для РСА КБ режима переднебокового обзора с компенсацией миграции дальности и частоты принимаемого сигнала и выбора оптимального времени синтезирования в зависимости от геометрии наблюдения и максимального угла отклонения луча в азимутальной плоскости.

Цель статьи – получение количественных оценок средней квадратической ошибки определения высот элементов земной поверхности в режиме однопроходной интерферометрии для типовых условий наблюдения.

1. Исходные данные

Для СКО измерения высот элементов земной поверхности или расположенных на ней объектов используется выражение вида [1]

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

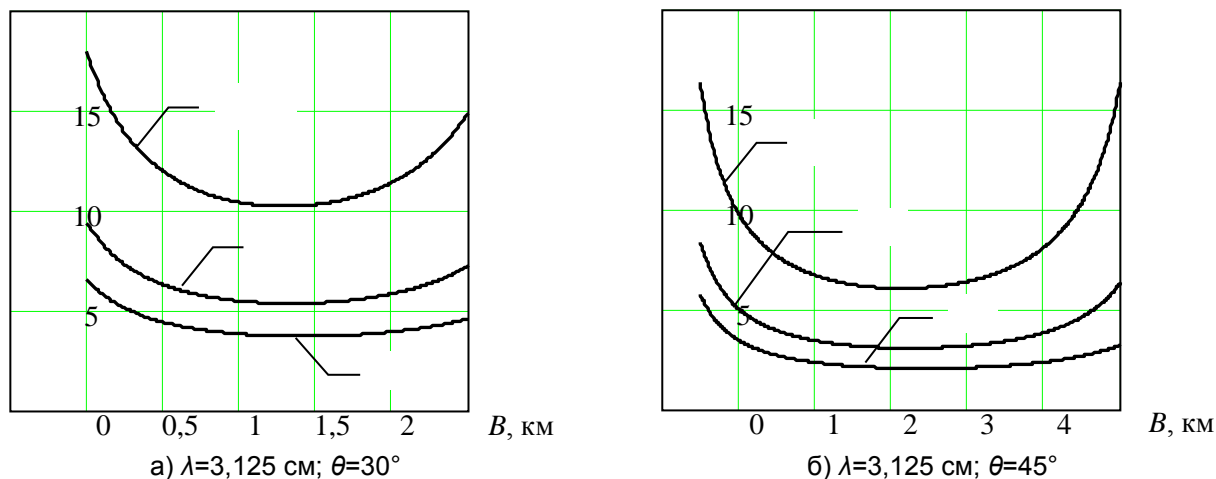
где $\frac{\partial \Delta}{\partial z} \Big|_{z=0}$ - производная от разности расстояний до центра наблюдаемой сцены при построении двух последовательно получаемых комплексных РЛИ; γ - коэффициент корреляции сигнала в элементе разрешения на РЛИ; λ - длина волны РСА.

Величина γ , которая может принимать значение от 0 до 1, определяется декорреляцией сигнала за счет пространственного разнесения антенн в разные моменты времени и отношением сигнал/шум ρ на РЛИ и зависит от высоты H орбиты КА, угла θ отклонения направления наблюдения от надира, угла α отклонения корпуса КА от вектора скорости, максимального угла α_{\max} электронного отклонения луча РСА в азимутальной плоскости, времени синтезирования T_C при построении двух последовательных радиолокационных изображения и разрешающей способности по наклонной дальности Δr . Кроме того, величина будет определяться средней квадратической высотой σ_h элементов земной поверхности и отношением ρ_{\max} сигнал/шум на радиолокационном изображении по мощности. База B интерферометрической съемки определяется в этом случае как $B = T_C V$, где V - орбитальная скорость КА (для типовых орбит 7300-7500 м/с).

Последовательность расчета входящих в (1) величин приведена в [1]. Расчет СКО измерения высоты проведем для следующих типовых исходных данных: $H=500$ км; $\lambda=3,125$ и $9,725$ см; $V=7500$ м/с; $\Delta r=1$ м; $\alpha=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$; $\theta=30^\circ, 45^\circ$; $\rho_{\max}=10$; $\alpha_{\max}=0,75^\circ$. Земная поверхность шероховатая с $\sigma_h=0.1$ м.

2. Результаты оптимизации интерферометрической базы и времени синтезирования

Результаты расчетов зависимостей СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для заданных условий наблюдения при измерении высот участков шероховатой земной поверхности приведены на рисунке 1.



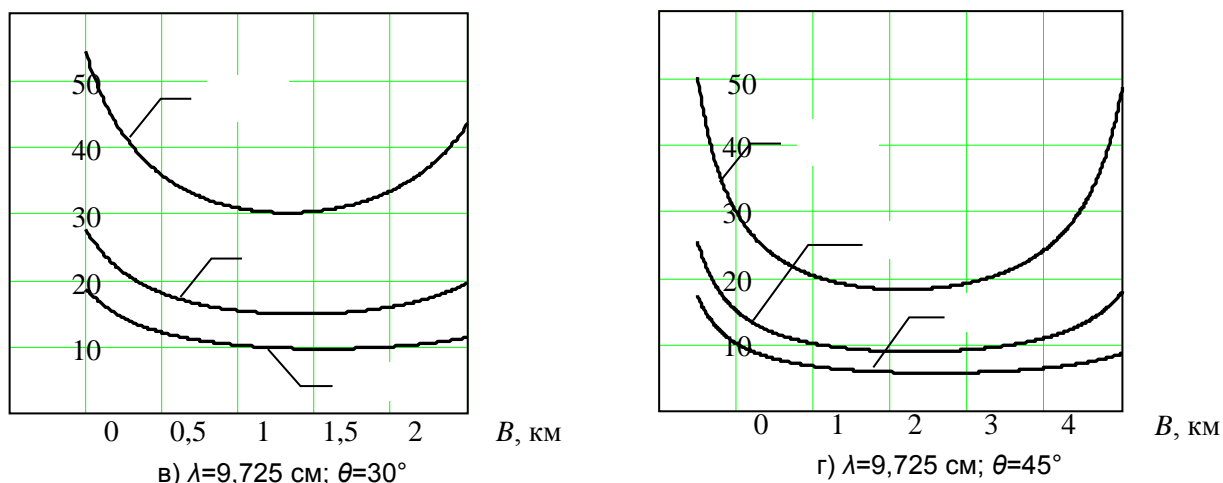


Рисунок 1 – Зависимости СКО измерения высоты участков шероховатой земной поверхности от интерферометрической базы

Как следует из полученных зависимостей, для РСА космического базирования, аналогично авиационным, существуют оптимальные значения интерферометрической базы и соответствующие значения времени синтезирования при построении двух последовательных радиолокационных изображений, при которых ошибки определения высоты минимальны. При этом оптимум выражен достаточно сильно. Значения оптимальных баз и соответствующие значения СКО определения высоты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Величина оптимальной базы и СКО измерения высоты

Длина волны, см	Угол места θ	$\alpha=60^\circ$		$\alpha=70^\circ$		$\alpha=80^\circ$	
		B , км	σ_z , м	B , км	σ_z , м	B , км	σ_z , м
3,125	30°	1,55-2,3	3,7	1,6-2,05	5,5	1,6-2	10,5
	45°	2,85-4,1	2,5	2,9-3,75	3,1	2,85-3,5	6,6
9,725	30°	1,9,2,3	9,9	1,65-2,25	15	1,75-1,9	30
	45°	3,1-4,3	5	2,8-3,9	9	2,85-3,6	19

Дополнительными факторами, оказывающим влияние на значение оптимальной базы, является ограничение сектора сканирования в азимутальной плоскости в единицы градусов, большая высота орбиты КА и угол отклонения строительной оси КА с установленной на нем антенной системой от вектора скорости в азимутальной плоскости. В частности, для РС КБ увеличение угла отклонения от надира с 30° до 45° приводит к уменьшению ошибок определения высоты в 1,5...2 раза. На первый взгляд, это выглядит парадоксально, так как увеличение угла отклонения от надира сопровождается увеличением наклонной дальности $R = H / \cos \theta$ до наблюдаемого участка земной поверхности, что сопровождается увеличением значений Δx разрешающей способности в поперечном направлении. Детальный анализ показывает, что указанное явление обусловлено более быстрым увеличением времени синтезирования при построении двух последовательных радиолокационных изображений при ограничении на сектор азимутального сканирования и характерно именно для РСА КБ.

Достижимые минимальные ошибки определения высоты элементов подстилающей поверхности сильно зависят от отклонения КА в азимутальной плоскости, что определяется величиной производной (2) в (9). Требуемый угол поворота КА в азимутальной плоскости составляет не менее 20° . При меньших значениях угла поворота ошибки резко возрастают. При одинаковых условиях наблюдения и увеличении длины волны РСА в 3 раза, значения ошибки возрастают примерно пропорционально при незначительном изменении величины оптимальной интерферометрической базы.

Наиболее существенным является фактор декорреляции отраженного от элемента разрешения сигнала при изменении ракурса наблюдения. Степень снижения величины корреляции сложным образом зависит от интерферометрической базы как напрямую, так и через разрешающую способность Δx по поперечной дальности.

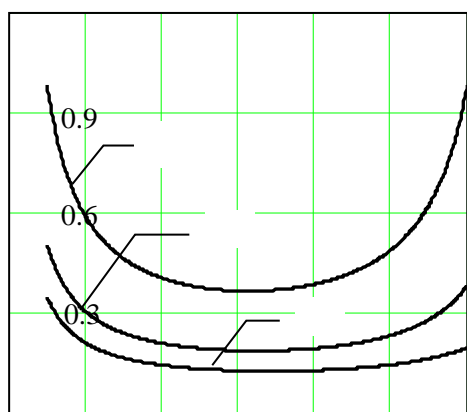
Для определенных условий представляет интерес значение оптимальной базы, времени синтезирования и достижимые ошибки оценивания высот для случая стабильных отражающих элементов, для которых амплитуда и фаза отраженного сигнала не зависит от ракурса по крайней мере на интервале наблюдения. Указанный случай соответствует стабильным блестящим точкам наземных объектов или, например, размещению уголкового отражателя в необходимых точках ледников, горных отвалов и выработок, на водной поверхности при контроле половодий и т.д.

В этом случае из выражения (5) в [1] необходимо исключить множители пространственной и разноракурсной декорреляции. Кроме того, при значительных значениях эффективной поверхности рассеяния отношение сигнал/шум на РЛИ следует выбирать большим. Примем, $\rho_{\max}=30$ дБ и учтем для точечного отражателя зависимость отношения сигнал/шум от интерферометрической базы согласно (9) в [1].

Результаты расчетов зависимостей СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для стабильного отражателя для тех же условий наблюдения, что и на рисунке 1, приведены на рисунке 2. Значения оптимальных баз и соответствующие значения СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для стабильного отражателя приведены в таблице 2.

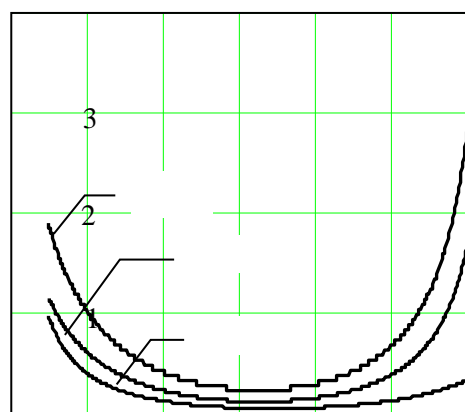
Как следует из полученных результатов, величина интерферометрической базы существенно изменились в сторону увеличения. Оптимальные значения интерферометрической базы составляют от 2 до 5 км. Отметим, что при указанных значениях оптимальной базы время синтезирования при построении каждого радиолокационного изображения меньше, чем половина потенциально достижимого, исходя из сектора углового сканирования по азимуту, максимального времени наблюдения. То есть, потенциальные возможности РСА по разрешающей способности, не используются. На интервале наблюдения в РСА будет использоваться два относительно коротких (сотни мс) интервала синтезирования, разнесенных более продолжительным промежутком. Отметим, что указанные допущения верны при ЭПР земной поверхности в элементе разрешения много меньше (в сотни раз), чем ЭПР точечного отражателя.

Средняя квадратическая ошибка измерения высот составляет, в зависимости от угла отклонения от надира и угла поворота корпуса КА по курсу 0,06...0,34 м для длины волны 3,125 см и 0,19...1,1 м для длины волны 9,725 см. При увеличении угла поворота КА в азимутальной плоскости величина ошибки уменьшается. Полученные величины СКО определяют потенциальную возможность использования однопроходного интерферометрического режима для целого ряда народнохозяйственных задач, например, оперативного оценивания изменения гидрографической ситуации в период половодий в труднодоступных районах.



а) $\lambda=3,125$ см; $\theta=30^\circ$

В, км



б) $\lambda=3,125$ см; $\theta=45^\circ$

В, км

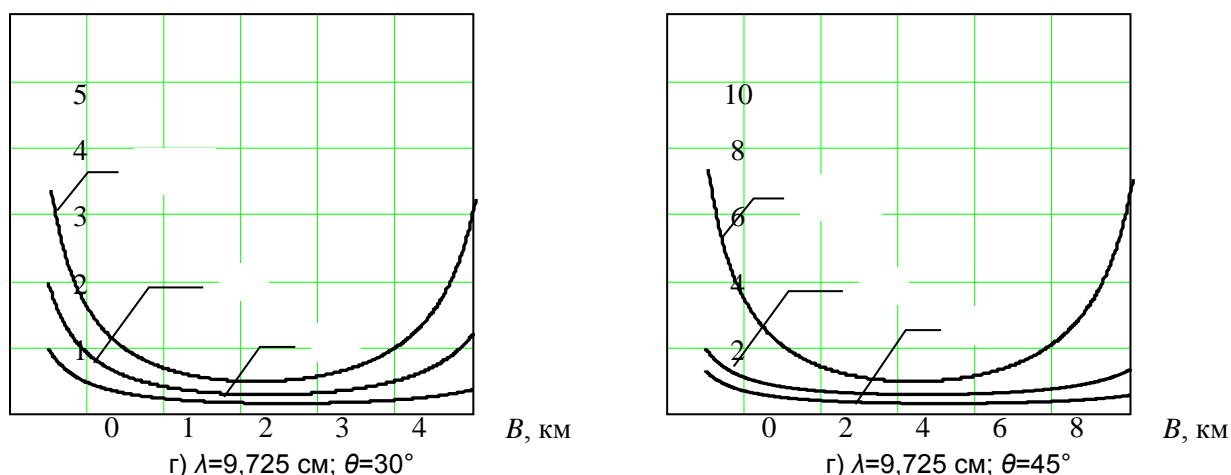


Рисунок 2 – Зависимости СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для стабильного отражателя при $\rho_{\max}=30$ дБ

Таблица 2 – Величина оптимальной базы и СКО измерения высоты для стабильного отражателя

Длина волны, см	Угол места θ	$\alpha=60^\circ$		$\alpha=70^\circ$		$\alpha=80^\circ$	
		B , км	σ_z , м	B , км	σ_z , м	B , км	σ_z , м
3,125	30°	3,12-3,14	0,1	2,88	0,16	2,74	0,34
	45°	5,42-5,43	0,06	4,99	0,099	4,75	0,2
9,725	30°	3,12-3,14	0,32	2,88	0,51	2,73-2,75	1,1
	45°	5,41-5,44	0,19	4,98-5	0,3	4,74-4,75	0,65

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании достижимых характеристик и областей применения РСА космического базирования при оперативном оценивании высот участков земной поверхности и высот объектов в режиме однопроходной интерферометрии.

Список использованных источников:

1. Лобан М.А. Методика оптимизации параметров радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии. В настоящем сборнике. 58-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2022. УДК 621.396
2. Шимкин П. Е., Бабокн 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. 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.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF A SYNTHETIC APERTURE SPACE RADAR IN SINGLE-PASS INTERFEROMETRY MODE

Loban M.A. 1

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. - Doctor of Technical Sciences

Annotation. The optimization of the synthesis time and the optimal base of the synthesized aperture radar (RSA) of space-based (KB) in the single-pass interferometry mode was carried out when solving the problems of operational assessment of the relief of the underlying surface on one orbit turn, taking into account the limited sector of electronic scanning in the azimuthal plane. Estimates of the root-mean-square error (RMS) of estimating the heights of reflecting elements are obtained, taking into account the observation geometry, the angle of rotation of the construction axis of the spacecraft relative to the velocity vector, restrictions on the maximum angle of deflection of the beam in the azimuthal plane.

57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, 2021 г.

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