



МЕТОД ТОМОГРАФИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ РСА ПЕРЕДНЕБОКОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ ОБЪЕМНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Научный коллектив:
к.т.н., доц. Шимкин Павел Евгеньевич
д.т.н. Бабокин Михаил Иванович

г. Москва
09-13 ноября 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

- 1) Рассмотрены особенности построения и основные характеристики **томографического комплекса** на базе однопозиционного космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА), работающего в режиме переднебокового наблюдения Земли за один проход без необходимости во второй приемной антенне.
- 2) Определены условия функционирования и требования к информационному обеспечению системы многоканальной обработки сигналов. **Проверена работоспособность** предложенного подхода по реальным сигналам двух диапазонов длин волн, полученных в ходе экспериментальных полётов.
- 3) Докладывается **алгоритмическая реализация** многомерной обработки парных сигналов, проверка и отладка которой осуществлены по реальным радиоголограммам. Особенностью при таком построении ТРСА становится возможность использования одного увеличенного интервала синтеза с разбиением на подынтервалы для организации пространственного разнесения многопарных приёмных апертур с целью осуществления многомерных разностно-фазовых радиолокационных измерений.
- 4) Демонстрируется возможность использования предлагаемой схемы построения томографического комплекса с РСА при решении задач получения **дополнительной информации** о состоянии поверхности Земли. Приведены первые экспериментальные результаты по отображению слоистых неоднородностей подстилающей поверхности путём применения многомерной разностно-фазовой обработки парных сигналов с помощью однопроходного РСА, работающего в режиме переднебокового обзора.

ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ РСА ПЕРЕДНЕБОКОВОГО ОБЗОРА

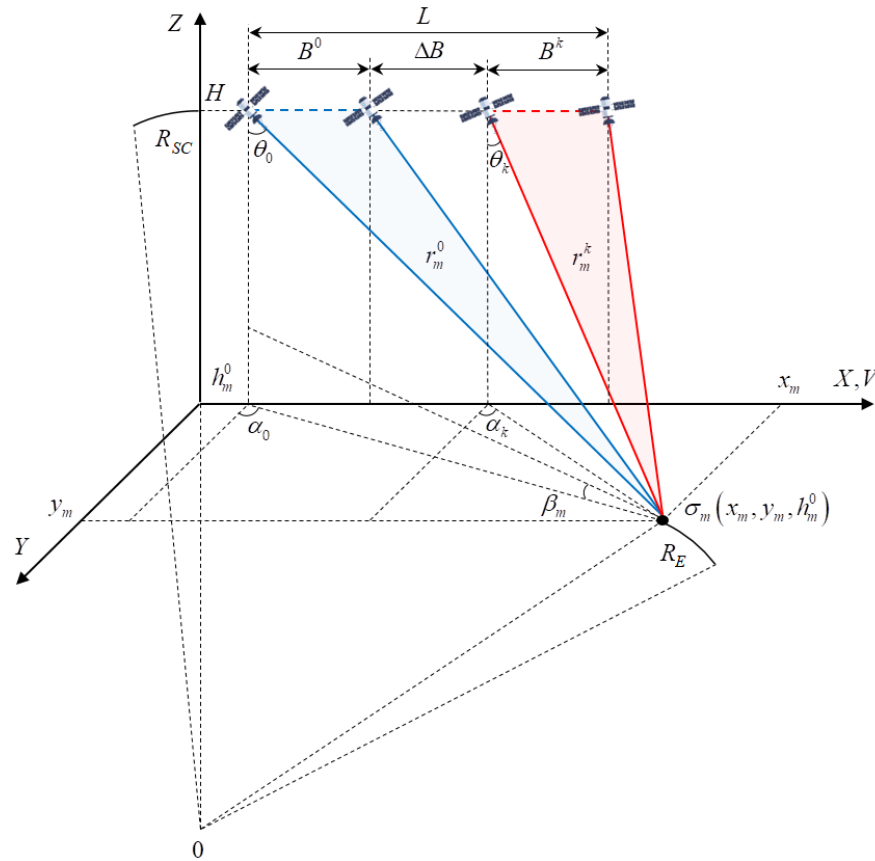


Рис. 2. Схема организации томографического РСА переднебокового обзора на базе космического носителя

$$r_m^k(t) \approx r_m^0 \left(1 + \frac{\tan^2 \alpha_k}{2} \right) - Vt \sin \alpha_k \sin \theta_m + \frac{(V \cos \alpha_k \sin \theta_m)^2}{2r_m^k(0)} t^2, \quad (1)$$

$$r_m^k(t + T_0) \approx r_m^k(t) - B \sin \alpha_k \sin \theta_m + \frac{(V \cos \alpha_k \sin \theta_m)^2}{r_m^k(0)} T_0 t,$$

$$r_m^k(t, h) \approx r_m^k(t) - Vt \sin \alpha_k \sin (\theta_m + \Delta \theta^h),$$

$$r_m^k(t + T_0, h) \approx r_m^k(t, h) - h_m \frac{B}{R_3} \sin \alpha_k \sin \theta_m, \quad (2)$$

Специфика томографических измерений требует более одной пары высокоррелированных сигналов, а в связи с тем, что в одном элементе РСА может оказаться несколько объектов расположенных на разной высоте, также необходимо получить несколько интерферометрических пар сигналов, полученных при разных углах наблюдения. Это позволит разрешить объекты по высоте.

При однопроходном построении ТРСА и скошенном обзоре поверхности, возможно получить эти несколько интерферометрических измерений на одном участке траектории полёта КА с последующей их фазовой коррекцией и комплексной обработкой. То есть, оперативно, без привлечения многих КА и сложных систем позиционирования, «вскрываются» многослойные объекты на земной поверхности.

$$\Delta r_m^k \approx \left[-B \sin \alpha_k \sin \theta_m + \frac{T_0 (V \cos \alpha_k \sin \theta_m)^2}{r_m^k(0)} t \right] - h_m \frac{B}{R_3} \sin \alpha_k \sin \theta_m, \quad (3)$$

$$\Delta \phi_m^k = \frac{4\pi}{\lambda} \left[B \sin \alpha_k \sin \theta_m + \frac{T_0 (V \cos \alpha_k \sin \theta_m)^2}{r_m^k(0)} t \right], \quad (4)$$

$$\Delta \hat{\phi}_m^k \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left[h_m \frac{B}{R_3} \left(\frac{X_0 - k \Delta B}{r_m^k(0)} \right) \right], \quad (5)$$

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Формирование банка комплексных двумерных РЛИ для реализации томографической обработки сигналов согласно блок-схеме

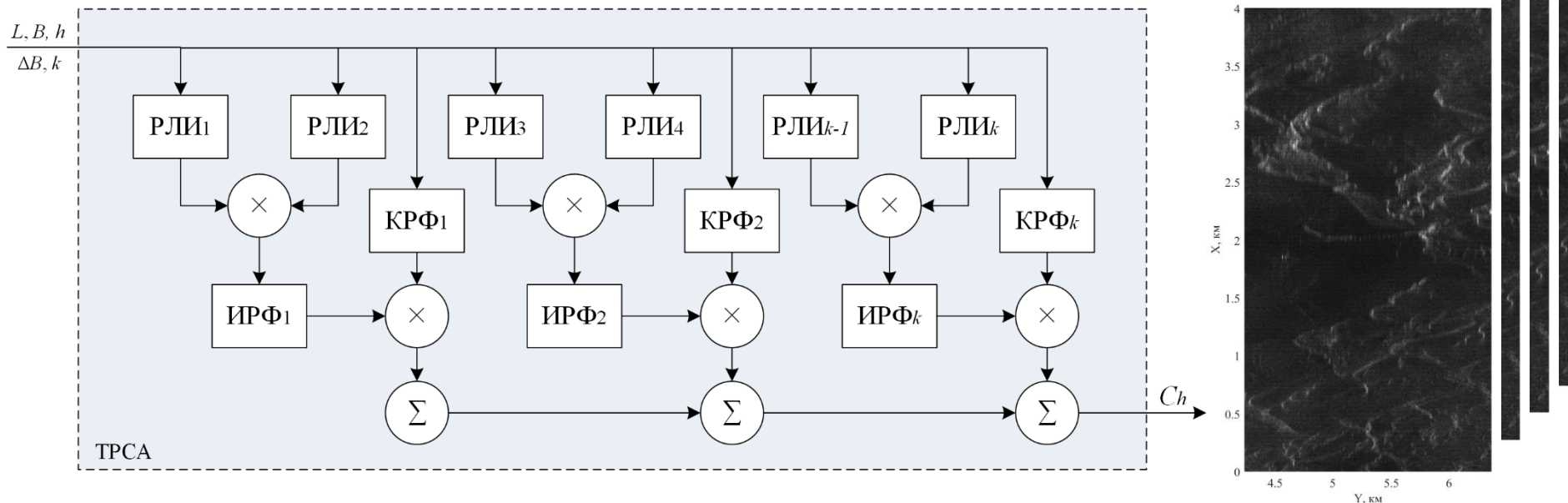


Рис. 2. Блок-схема алгоритма пространственно-временной обработки сигналов в интерферометрическом РСА переднебокового обзора

Принятые сокращения и условные обозначения:

ТРСА – томографический радиолокатор с синтезированной апертурой; РЛИ – радиолокационное изображение; ИРФ – интерферометрическая разность фаз; КРФ – компенсация разности фаз;

L – длина синтеза апертуры [м]; B – база интерферометра [м]; h – высота опорного слоя в ТРСА [м];

$\Delta B > B$ – расстояние между участками парных измерений [м]; Ch – результат обработки на высоте h ;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры съемки и обработки сигналов, эксперименты 1 и 2:

$L = 36$ км; $B = 3$ км; $\Delta B = 3B = 9$ км; $\alpha = 0,5^\circ \dots 2,5^\circ$, $\lambda = 9$ см и 24 см

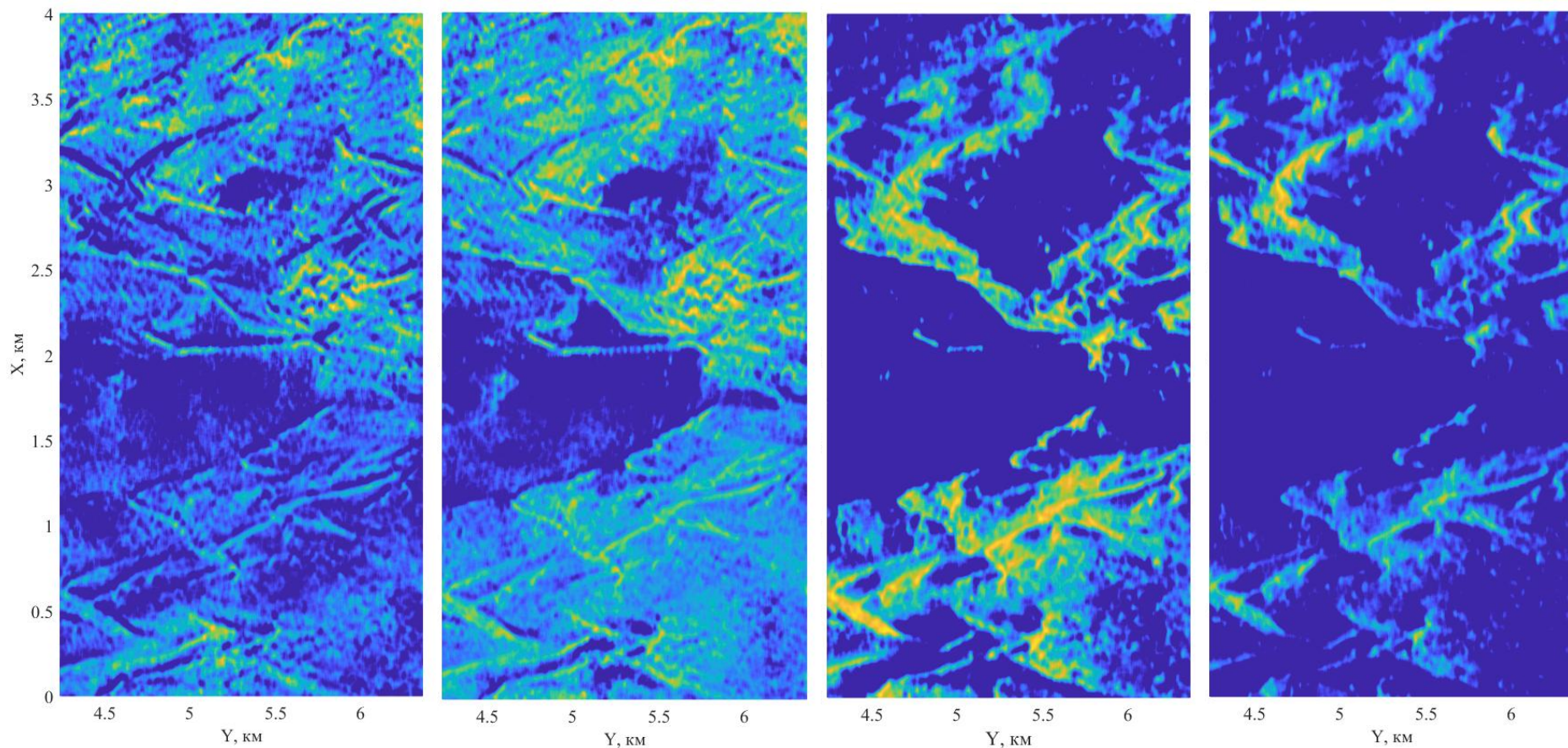


Рис. 3. Эксперимент 1, слева-направо результаты томографической обработки (аргумент комплексного коэффициента отражения) для слоев на высоте h :
-800 м; -400 м; 0 м (опорный рельеф поверхности); +400 м

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

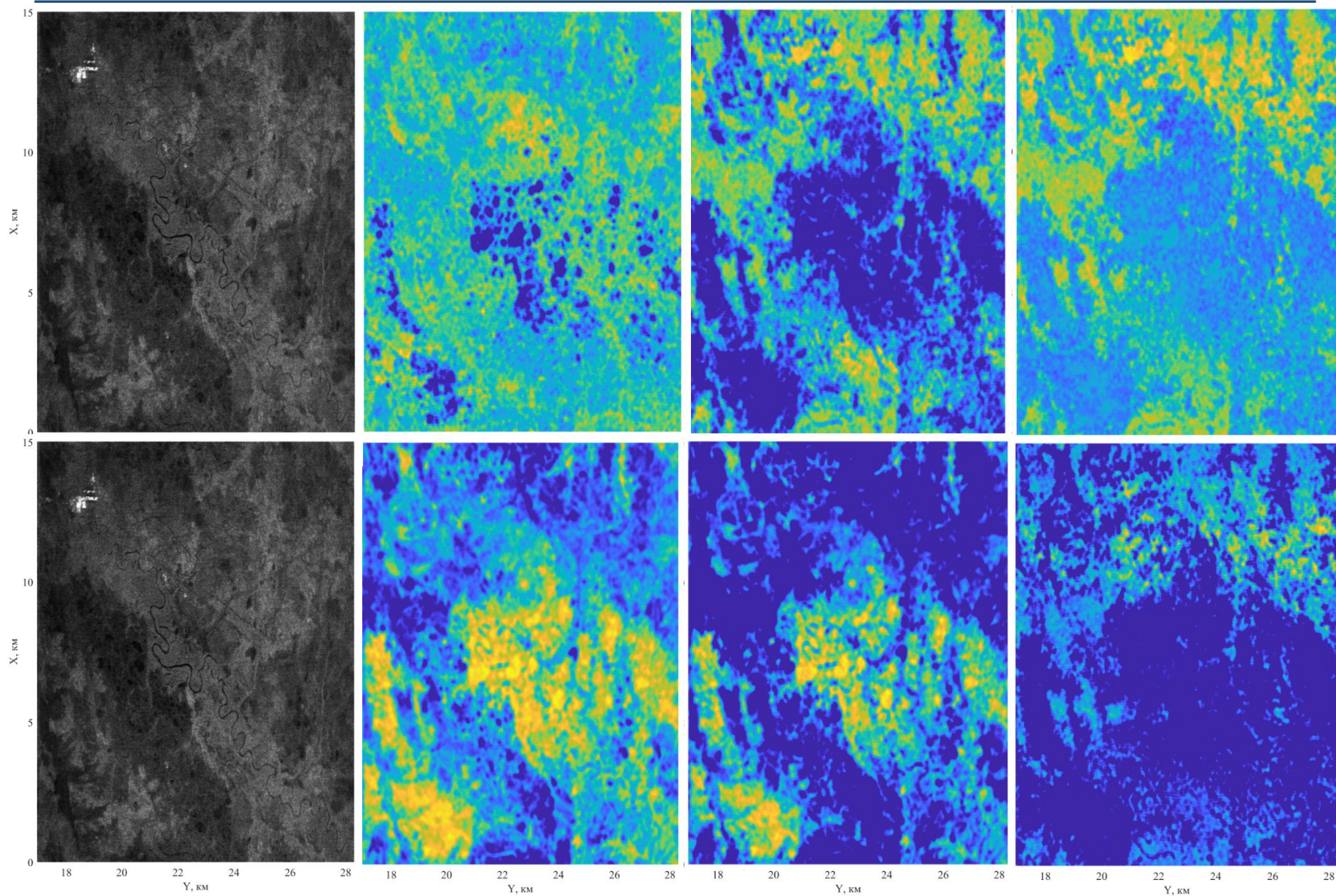


Рис. 3. Эксперимент 2, результат ТРСА (аргумент) слева-направо сверху вниз для слоев на h : -600 м; -400 м; -200 м; 0 м (опорный рельеф поверхности); +200 м; +400 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Томографические измерения космическими комплексами РСА требуют новых научных и технических решений для повышения возможностей современных систем ДЗЗ. Одним из возможных путей дальнейшего развития средств ДЗЗ является разработка комплексов РСА с одновременным формированием многомерных парных сигналов, т.е. рассмотренный ТРСА. В докладе рассмотрены особенности построения и основные характеристики ТРСА с оперативным получением информации с одновременным формированием ряда многомерных парных сигналов на одной траектории КА. На примере выборочных РСА двух диапазонов длин волн продемонстрировано экспериментальное подтверждение работоспособности переднебокового ТРСА для оценки фазовой структуры коэффициента отражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабочкин М.И.** Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 336 с.
2. **Бабочкин М.И., Шимкин П.Е.** Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 49–59. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59
3. Турук В.Э., Вербя В.С., Голованова М.В. и др. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 69 – 83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83
4. Fornaro G., Pascazio V. SAR interferometry and Tomography: Theory and Applications // Academic Press Library in Signal Processing. 2014. V. 2. P. 1043–1117. DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.
5. Fornaro G., Lombardini F., Serafino F. Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with longterm spaceborne data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 4. P. 702–714. DOI: 10.1109/TGRS.2005.843567.
6. Ka M.-H., **Shimkin P.E.**, Baskakov A. I., **Babokin M. I.** A New Single-Pass SAR Interferometry Technique with a Single-Antenna for Terrain Height Measurements // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 9. Art. No. 1070. DOI: 10.3390/rs11091070.
7. Khoshnevis S.A., Ghorshi S. A tutorial on tomographic synthetic aperture radar methods // SN Applied Sciences. 2020. V. 2. Art. No. 1504. DOI: 10.1007/s42452-020-03298-6.
8. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2013. V. 1. No. 1. P. 6–43. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
9. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. V. 5. No. 2. P. 716–807.
10. Ponce O., Prats-Iraola P., Scheiber R., Reigber A., Moreira A. First Airborne Demonstration of Holographic SAR Tomography with Fully Polarimetric Multicircular Acquisitions at L-Band // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 10. P. 6170–6196. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2582959.