



АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ РСА ПЕРЕДНЕБОКОВОГО ОБЗОРА

Научный коллектив:

к.т.н., доц. Шимкин Павел Евгеньевич

д.т.н. Бабокин Михаил Иванович

асп. Митрофанов Вадим Витальевич

г. Москва

09-13 ноября 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

- 1) доклад посвящен **алгоритму** пространственно-временной обработки сигналов, в частности при его реализации в интерферометрической системе с радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА), работающей в режиме **переднебокового обзора**;
- 2) в такой конфигурации данные, полученные с различных субапертур, подвергаются разностно-фазовой обработке радиосигналов, при этом интерферометрическая база определяется **временным сдвигом** (в шкале «медленного времени») между субапертурами и может быть оптимизирована для решения различных задач;
- 3) в докладе продемонстрирована возможность использования **однопроходной схемы** с РСА переднебокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности на основе обработки реальных радиолокационных данных, полученных в ходе испытательных полетов с борта **авиационного РСА**;
- 4) в докладе приведены **этапы обработки сигналов**, необходимые для извлечения информации о высотах из исходных данных. Достоверность полученных значений высот в характерных точках подтверждается путем сопоставления трехмерных изображений местности с **топографическими** данными;
- 5) рассмотренная в докладе конфигурация может быть применена для решения смежных задач, например, при реализации **метода радиолокационной томографии** поверхности Земли.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ РСА ПЕРЕДНЕБОКОВОГО ОБЗОРА

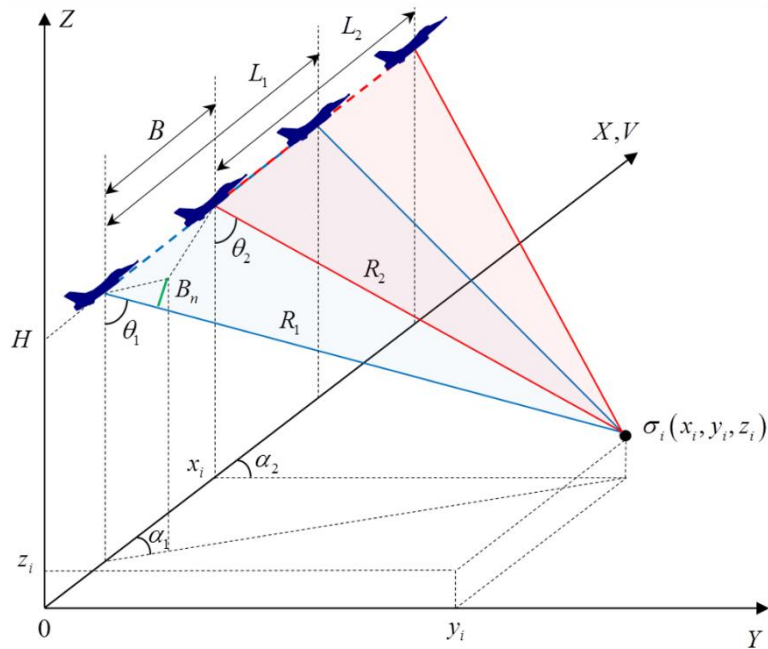


Рис. 2. Схема организации РСА интерферометра переднебокового обзора

$$z = H - R_1 \sqrt{1 - \left\{ \frac{R_1^2 + B^2 - [R_1 - \lambda \phi / (4\pi)]^2}{2R_1 B \cos \alpha_1} \right\}^2}, \quad (1)$$

$$\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_1 \cos \alpha_1 + \frac{4\pi B_n}{\lambda R_1 \sin \theta_1} z, \quad (2)$$

$$\delta \phi \approx \frac{4\pi B_n}{\lambda R_1 \sin \theta_1} \delta z. \quad (3)$$

Отличие от традиционных известных схем ИРСА заключается в том, что пространственное разнесение обеспечивается естественным перемещением носителя РСА и стабилизацией луча в режиме телескопического обзора.

Возможно использование единого интервала синтеза с разделением его на подынтервалы или субапертуры на этапе цифровой обработки для реализации ИРСА. За счет этого доступны следующие преимущества:

- 1) оптимизация размера базы для каждого пикселя изображения с целью минимизации ошибки оценки высоты;
- 2) возможность гибкого изменения размера базы для устранения фазовой неоднозначности с использованием многобазового метода.

$$I(j, f_d) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \text{image}_1(l+i, f_d+j) \cdot \text{image}_2^*(l+i, f_d+j) \quad (4)$$

$$\hat{\phi}(l, f_d) = \arctan_4 \left\{ \frac{\text{Im}[I(l, f_d)]}{\text{Re}[I(l, f_d)]} \right\}, \quad (5)$$

$$f_d \rightarrow x = \frac{\lambda R_1}{2V \sin \alpha_1} f_d, \quad (6)$$

$$l \rightarrow y = \frac{R_1 + cT_s l / 2}{\sin \theta_1}, \quad (7)$$

$$\hat{\phi} \rightarrow z = \frac{\lambda H \tan \theta_1}{4\pi B \cos \alpha_1 \cos \theta_1} \hat{\phi}(\gamma > 0.7), \quad (8)$$

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для реализации всех этапов обработки применяется пакет прикладных программ **MATLAB**, задание параметров обработки реализовано с помощью графического интерфейса пользователя

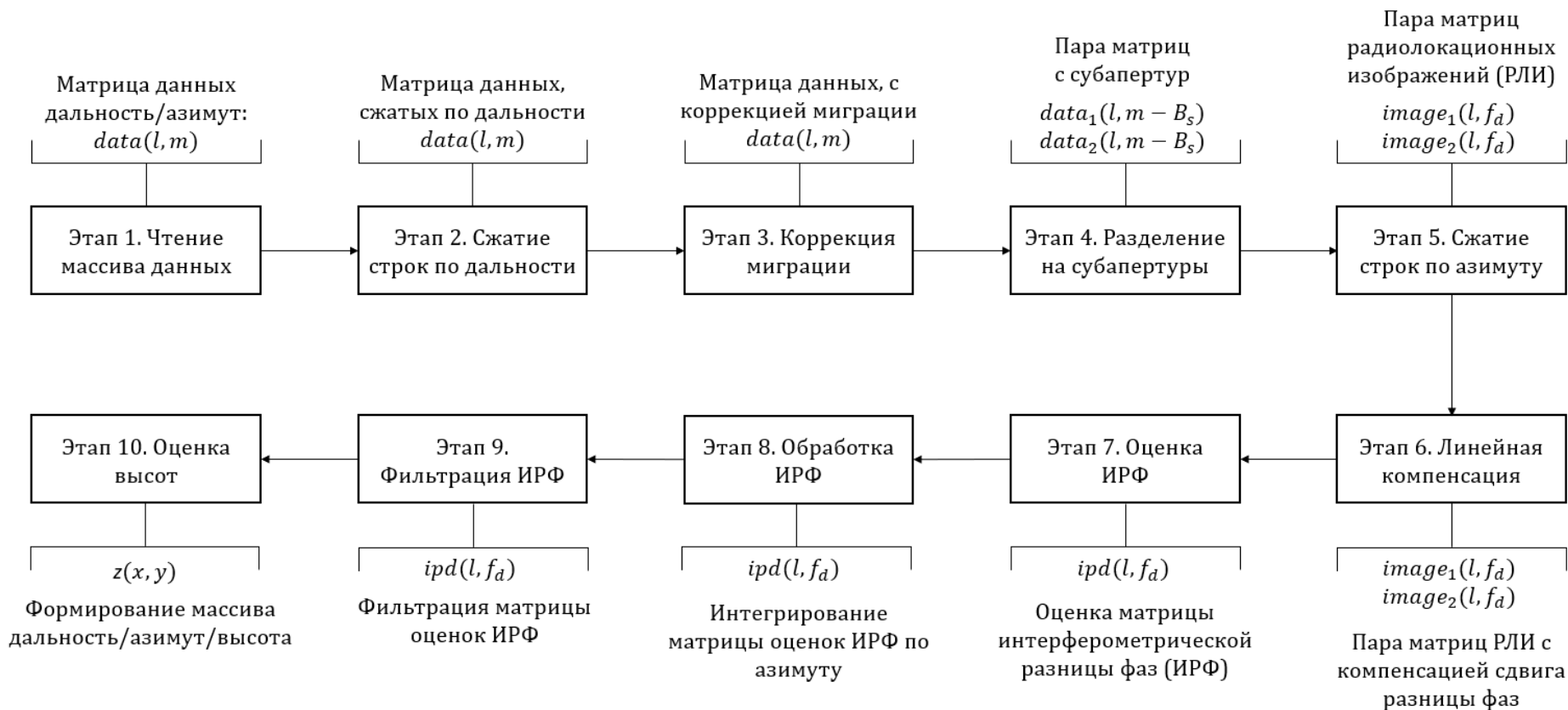


Рис. 2. Блок-схема алгоритма пространственно-временной обработки сигналов в интерферометрическом РСА переднебокового обзора

Параметры съемки и обработки сигналов, используемые на следующих слайдах:

$R_1 = 25$ км, $H = 5$ км, $\alpha = 20^\circ$, $V = 170$ м/с, $l = 524$, $m = 1700$, $L = 290$ м, $B = 32$ м, $\lambda = 3$ см, разрешающая способность по дальности $\Delta y \sim 15$ м, по азимуту после усреднения $\Delta x \sim 10$ м

ПРИМЕР ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

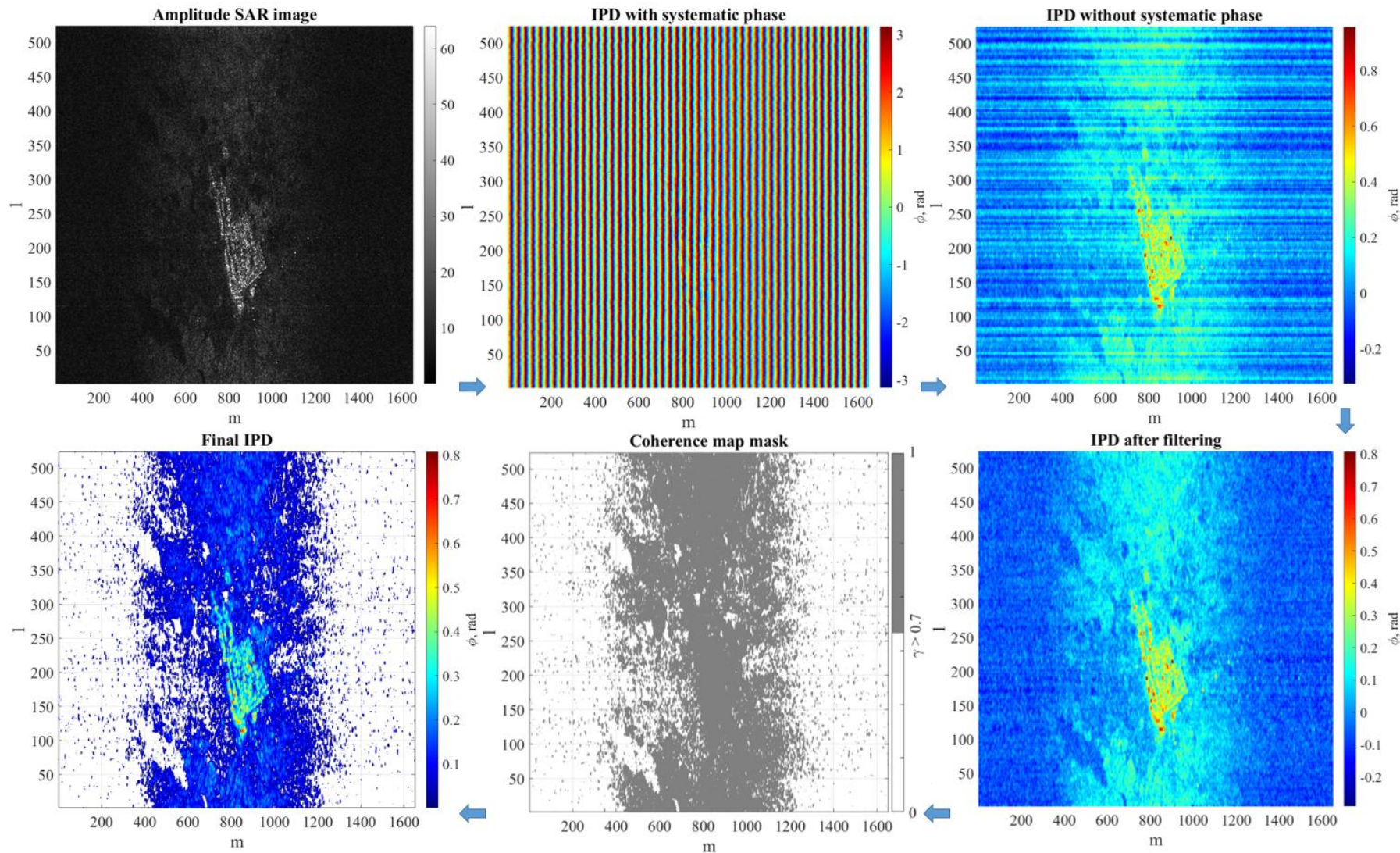


Рис. 4. Результаты пространственно-временной обработки сигналов согласно этапам 5-8 согласно блок-схеме алгоритма, эксперимент 2 (поселок городского типа)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

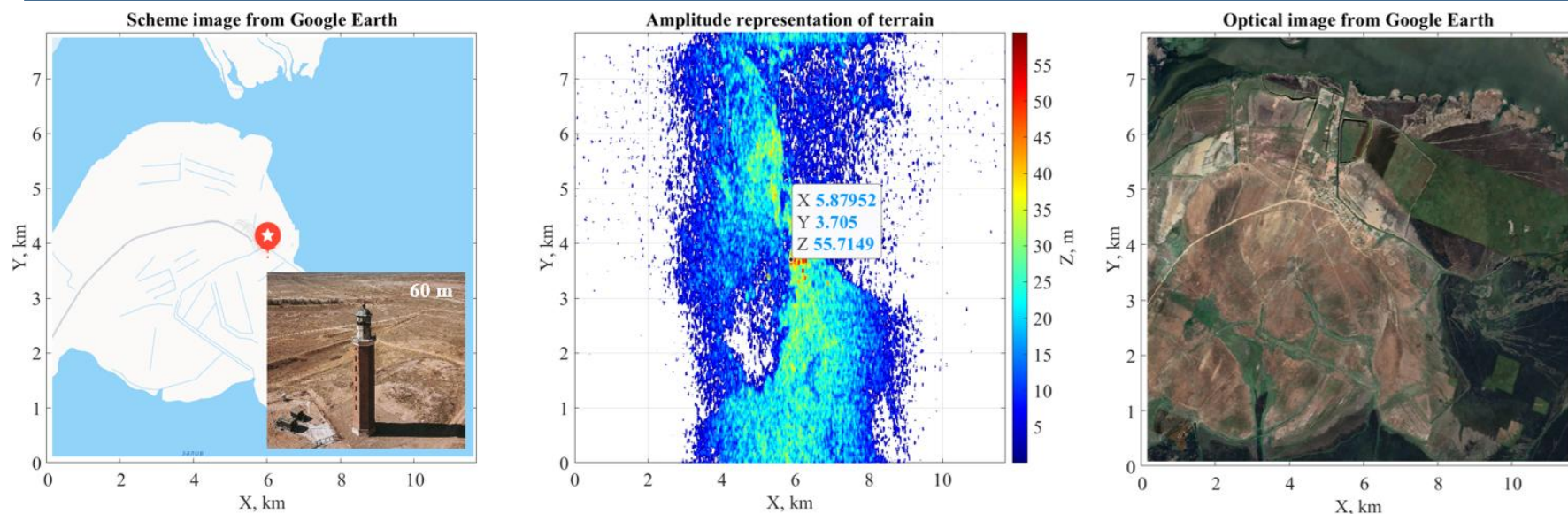


Рис. 5. Результаты эксперимента 1 (маяк на фоне высохшего озера)

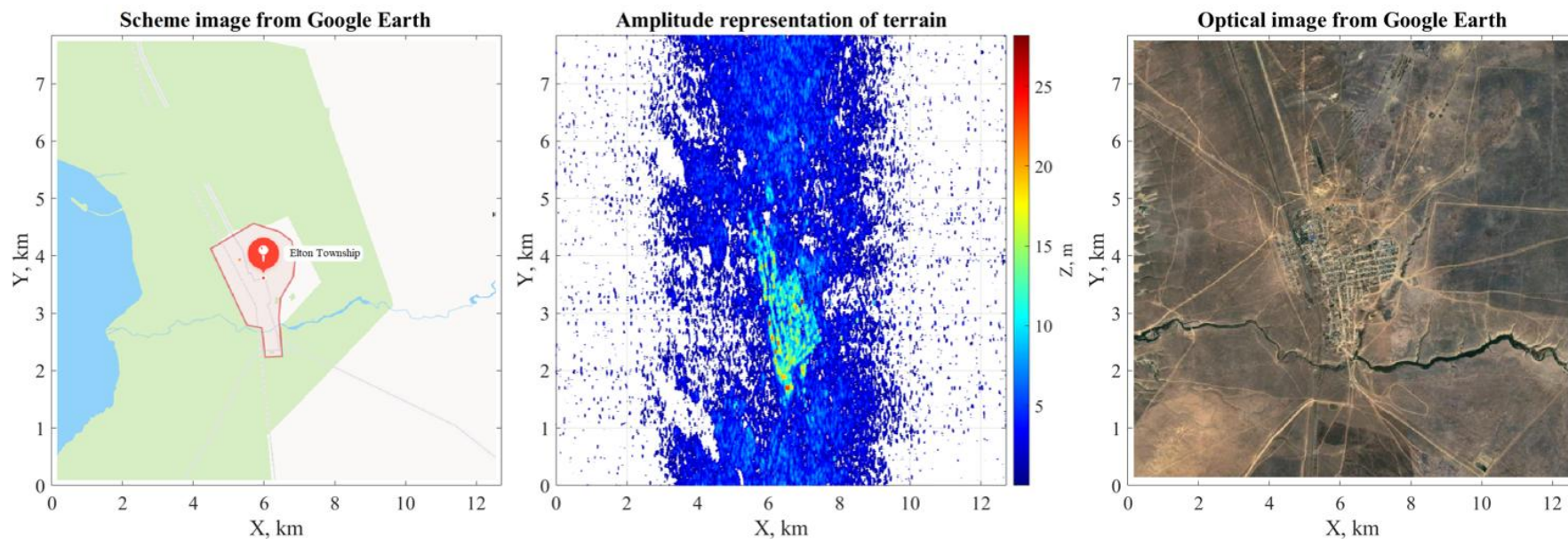


Рис. 6. Результаты эксперимента 2 (поселок городского типа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальная проверка алгоритма пространственно-временной обработки сигналов в интерферометрическом РСА переднебокового обзора продемонстрировала возможность его использования для оперативного измерения рельефа подстилающей поверхности. Результаты проверки работы алгоритмов показывают, что данные о характерных элементах рельефа местности, полученные с помощью предложенного метода интерферометрической съемки, согласуются с топографическими данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабокин М.И.** Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 336 с.
2. **Бабокин 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. 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.
4. 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.
5. **Шимкин П.Е., Баскаков А.И., Бабокин М.И.** «Способ измерения рельефа поверхности Земли», патент РФ 2 643 790, 06.02.2018.
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.