

Интерферометрическая оценка вертикальных подвижек земной поверхности с помощью РСА переднебокового обзора

М.И. Бабокин^{1, 2, 3}, П.Е. Шимкин², В.Г. Степин^{2, 3}, К.С. Харлампьев²

¹ АО «АЭРОКОН»

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 13

E-mail: shimkinpy@mpei.ru

³ АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»

140180, г. Жуковский, ул. Гагарина, 3.

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

Рассмотрены особенности построения и основные характеристики радиолокационного дифференциального интерферометрического комплекса на базе однопозиционного радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА), работающего в режиме переднебокового обзора. Проверена работоспособность предложенного подхода для измерения вертикальных подвижек земной поверхности по реальным радиоголограммам, полученным по данным ДЗЗ.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), дифференциальный интерферометрический РСА, результаты эксперимента

Interferometric estimation of vertical shifts of the earth's surface using SAR in squint mode

M.I. Babokin^{1, 2}, P.E. Shimkin², V.G. Stepin^{2, 3}, K.S. Kharlampiev²

¹ JSC Aerocon

² National Research University MPEI

³ JSC V.V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design

The design features and main characteristics of a differential interferometric radar complex based on a single-position radar with a synthetic aperture antenna (SAR), operating in the squint mode, are considered. The performance of the proposed approach for measuring vertical movements of the earth's surface using real radio holograms obtained from remote sensing data was tested.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), differential interferometric SAR, experiment results

Введение

Существующие на сегодняшний день подходы к обработке радиолокационной информации, получаемой с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), в том числе и дифференциальных интерферометрических РСА (ДИРСА), выходят далеко за рамки возможностей традиционных методов радиовидения, и уже были продемонстрированы для отслеживания временных изменений недр природных сред, а также для обеспечения повышенной чувствительности к био- и геофизическим параметрам.

Целью настоящей работы является обоснование возможностей дифференциальных интерферометрических комплексов РСА для обнаружения и измерения вертикальных подвижек Земли на базе однопроходных РСА переднебокового обзора [1–10],

обладающих простотой реализации, высокой оперативностью получения информации и повышенной помехозащищённостью.

Математическая модель траекторного сигнала

Однопроходный способ построения РСА дифференциального интерферометра реализуется при многосеансной и многопроходной съёмке Земли (как минимум два сеанса наблюдения в каждом проходе (проходов – минимум два) с применением одного космического аппарата (КА), или другого носителя РСА переднебокового обзора. Комплексное изображение одного участка формируется несколько раз в каждом проходе в пределах одного рабочего участка орбиты.

На рис. 1 представлена геометрическая схема однопроходного космического ДИРСА при переднебоковом обзоре. Пространственное разнесение приемных апертур обеспечивается за счет естественного перемещения КА при движении с путевой скоростью V . Наблюдение земной поверхности ведётся при отклоненном угле наблюдения α в первом сеансе наблюдения. Через определенный интервал $B = VT_0$, $T_0 < T_C / 4$, T_C – время синтезирования РСА, второй сеанс возобновляется, так что значительная часть сигналов первого и второго сеансов повторяется, что определяет их высокую степень корреляции.

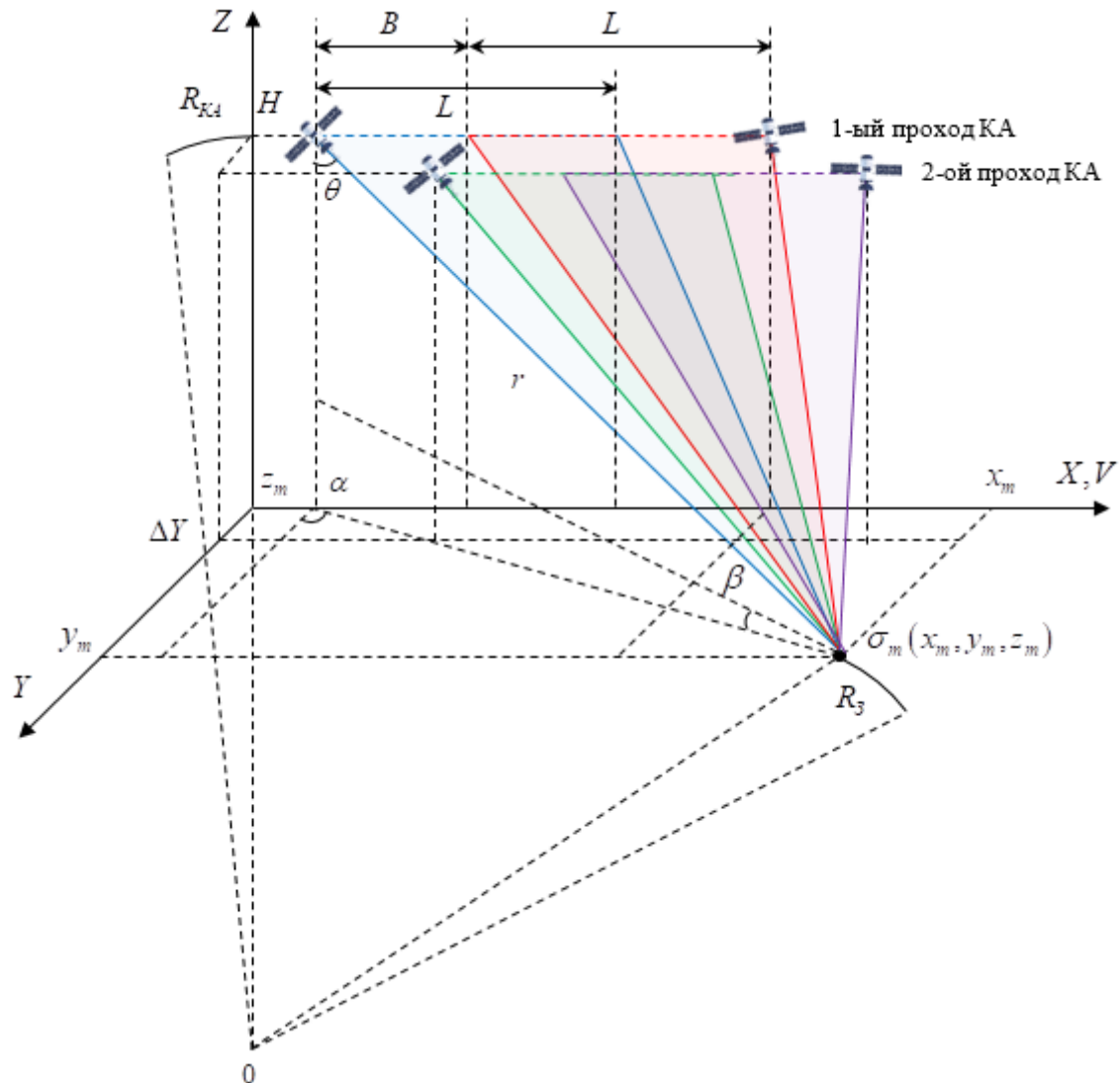


Рис. 1. Геометрия визирования однопозиционного ДИРСА переднебокового обзора

Специфика ДИРСА измерений требует более одной пары высоко коррелированных сигналов, полученных при каждом проходе носителя РСА (номер сеанса наблюдения). Смежные проходы (ν номер прохода КА или другого носителя), следующие через определённые промежутки времени (сутки, неделя, месяц, год) и могут совпадать или отклоняться по высоте и в направлении, поперечном движению. На рис. 1 показано только смещение так, что второй проход осуществляется на той же высоте полета носителя Н, как и при первом проходе.

Алгоритм оценивания подвижек земной поверхности можно записать следующим образом [1 – 3]:

$$\hat{\Delta}_{mn} \approx \frac{\lambda r_m}{4\pi B \cos(\theta_m^v + \beta) \sin \alpha} \arg \left(\hat{d}_{mn}^{v-1} \hat{d}_{mn}^{v*} \right), \quad (1)$$

где $\hat{\Delta}_{mn}$ – оценка сдвигов земной поверхности m, n – го элемента разрешения;

m, n – номер элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно;

$r_m = R_3 \cos(\theta_m + \beta) / \sin \theta_m$ – дальность до m -го элемента разрешения;

$R_3 \approx 6371$ – радиус Земли на широте объекта наблюдения;

$\beta = \arccos \left[(1 + H/R_3) \sin \theta \right]$ – угол между направлением КА от центра зоны обзора и плоскостью местного горизонта или угол скольжения;

$\hat{d}_{mn}^{v-1} = \hat{e}_{mn}^{l, v-1} \hat{e}_{mn}^{*l-1, v-1}$, $\hat{d}_{mn}^v = \hat{e}_{mn}^{l, v} \hat{e}_{mn}^{*l-1, v}$ – две комплексные оценки, полученные в результате обработки ДИРСА как комплексного сопряжения приведённых парных сигналов при двух смежных проходах носителя РСА.

Сеансы в первом и втором проходе следуют со смещением в четверть (или менее) интервала синтезирования в каждом проходе ДИРСА и фазу переотражения элемента разрешения можно считать неизменной, поэтому компенсация фазы переотражения будет полной (до шумов). Фазовые искажения в среде распространения будут также компенсированы, поскольку смещение между сеансами составляет менее секунды.

Подобный многопроходный (двухпроходный) метод, реализуемый с помощью ДИРСА в режиме однопроходного переднебокового обзора имеет принципиальное отличие от классических многопроходных ИРСА, поскольку в каждом проходе реализуется компенсация мешающих фазовых искажений, практически на одном интервале синтезирования. Если этого не делать, то в разных проходах эти отклонения (из-за среды распространения или изменений радиофизических свойств поверхности) могут изменяться и приводить к значительным ошибкам оценивания сдвигов поверхности.

Потенциальная точность оценки вертикальных смещений

Математическое выражение для оценки среднеквадратического отклонения (СКО) при измерении вертикальных подвижек земной поверхности с учетом смещения носителя РСА во втором проходе при дифференциальном наблюдении Земли определено следующим образом [1 – 3]:

$$\sigma_{mn}^{\Delta} \approx \frac{\lambda r_m}{4\pi B \sin \alpha \cos(\theta_m + \beta)} \left(\frac{1}{q} + \frac{1 - \Delta r_e}{2} \right), \quad (2)$$

где q – отношение сигнал/шум (ОСШ);

$\Delta r_e \approx \sin \left[2\pi \Delta Y \Delta y / (\lambda r_m) \right] / \left[2\pi \Delta Y \Delta y / (\lambda r_m) \right]$ – коэффициент корреляции парных сигналов;

Δy – величина разрешающей способности по земной дальности.

На рис. 2 представлены зависимости ошибки оценивания подвижек земной поверхности от угла падения без учета смещения носителя во втором проходе ($\Delta r_e = 1$) и с учетом несовпадения орбит в различных проходах ДИРСА или неточности знания положения ($\Delta r_e < 1$). Параметры съемки следующие: $H = 500$ км, $B = 5$ км, $\lambda = 24$ см, $\alpha = 10^\circ$, $\Delta Y = 1$ км, $\Delta y = 3$ м.

Из анализа зависимостей, показанных на рис. 2 можно сделать вывод, что потенциальная точность оценивания изменений земной поверхности может достигать долей длины волны излучения при реализации переднебокового режима обзора, особенно при больших углах падения и отношении сигнал/шум $\approx 10 \dots 20$ дБ.

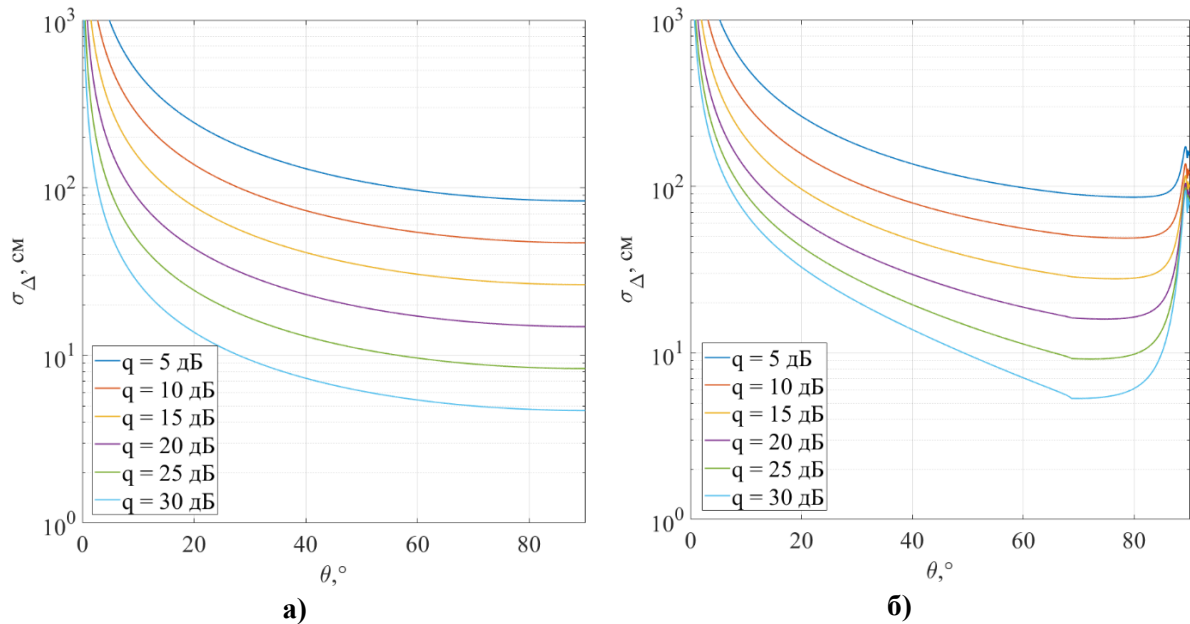


Рис. 2. Потенциальная точность оценивания сдвигов земной поверхности:
а) – без учета смещения носителя РСА; б) – с учетом смещения носителя РСА

Дополнительные ошибки в ДИРСА возникают из-за расхождения орбит в различных проходах или неточности знания положения, скорости носителя или угловой ориентации и т.п., потому немало усилий потребуется для компенсации влияния этих явлений. Так, если второй проход произошёл со смещением в 1 км, то, как показано на рис. 2 б), точность измерения понизится практически в два раза.

Экспериментальная проверка работоспособности

На рис. 3 представлена иллюстрация возможности обнаружения сдвигов земной поверхности по информации рассматриваемого в работе ДИРСА в двух проходах при $\alpha \approx 2^\circ$ на примере наблюдения за гористым районом Сихоте – Алинской гряды с перепадами высот местного рельефа до 500...1000 м. Следует отметить, что в этом районе производится активная горная добыча ископаемых. Слева на рис. 3 представлено соответствующее РЛИ с пространственной разрешающей способностью примерно 20 м, длина волны 24 см. Затем следуют два фазовых изображения в амплитудном представлении, являющиеся результатом обнаружения и измерения сдвигов земной поверхности земли по изменению рельефа местности, полученного с помощью рассматриваемого ДИРСА. Два смежных прохода следуют через два с половиной года. Результаты получены для согласованной НН и перекрёстной НV поляризации, которые имеют значительные структурные изменения и могут нести дополнительную информацию о физических процессах вертикальных подвижек земной поверхности.

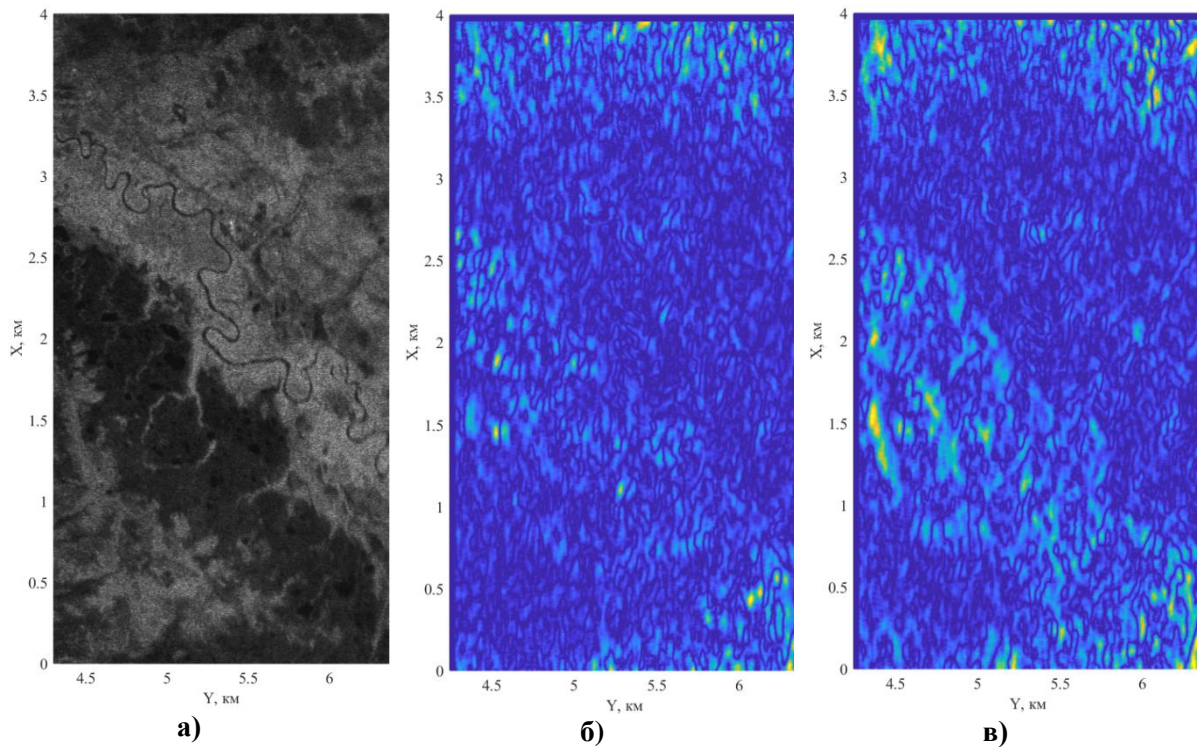


Рис. 3. Экспериментальная проверка обнаружения сдвигов земной поверхности в районе Сихоте-Алинской грады за период с 05.02.2015 по 07.09.2017:
а) – радиолокационное изображение; б) – результат при измерениях в НН поляризации;
в) – результат при измерениях в НV поляризации

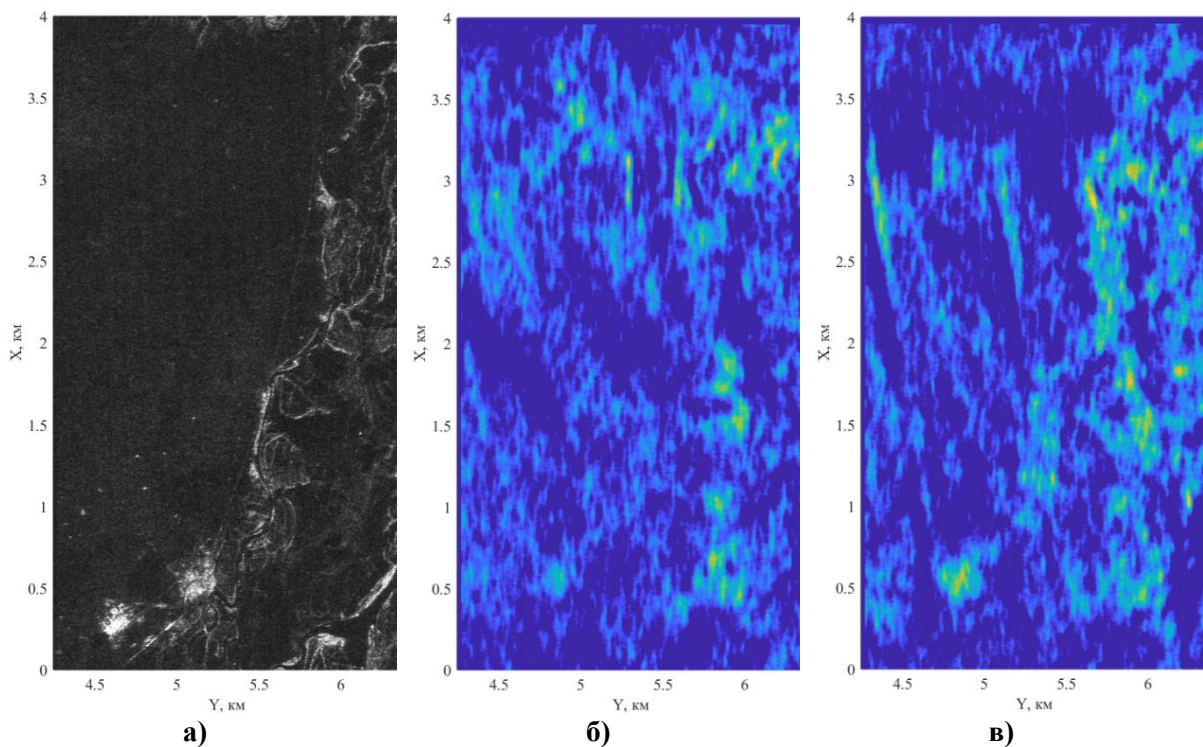


Рис. 4. Экспериментальная проверка обнаружения сдвигов земной поверхности в районе Астраханской области за период с 24.03.2015 по 12.12.2017:
а) – радиолокационное изображение; б) – результат при измерениях в НН поляризации;
в) – результат при измерениях в НV поляризации

Анализ результатов показывает, что в одной области (между горами гряды) подвижки достигают 15...20 см и можно выделить изменения в структуре поверхностного слоя.

На рис. 4 представлена подобная иллюстрация обнаружения подвижек земной поверхности по информации скошенного интерферометра в двух проходах при $\alpha \approx 2^\circ$ на примере наблюдения за равнинной поверхностью Астраханской области со сложной подповерхностной обстановкой. Как и в предыдущем случае, вначале следует РЛИ, а затем – два фазоразностных изображения в амплитудном представлении. Хотелось бы отметить перекрестную поляризацию, где особенно проявляются подвижки подповерхностных структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>.

Выводы

Представленные результаты анализа, достоинств и ограничений рассмотренного ДИСРА при однопроходном переднебоковом обзоре земной поверхности, позволяют сделать вывод о возможности обнаружения и измерения сдвигов земной поверхности с компенсацией пространственных и временных искажений сигналов за счёт фазоразностной обработки многомерных сигналов и обеспечить реальную точность измерения подвижек в доли длины волны.

Литература

1. Бабокин М. И. Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра тех. наук. М., 2010. 336 с.
2. Бабокин М. И., Ефимов А. В., Карпов О. А., Титов М. П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7. С. 16–20.
3. Бабокин М.И., Шимкин П.Е. Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2023. № 2. С. 49–59.
4. Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И. Локационные методы исследования объектов и сред. Учебник для студентов высших учебных заведений; под редакцией А.И. Баскакова. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 384 с.
5. Верба В. С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования; под общей редакцией Вербы В.С. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации; под редакцией проф. В.Ф. Кравченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 704 с.
7. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под. ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. 368с.
8. Шимкин П. Е., Бабокин М. И., Баскаков А. И. Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. № 5. С. 103–112.
9. Шимкин П. Е., Баскаков А. И., Бабокин М. И. Способ измерения рельефа поверхности Земли. Патент РФ 2643790. Рег. 06.02.2018.
10. 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 Sens. 2019, 11, 1070. doi: 10.3390/rs11091070.