

## Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли

М. И. Бабокин<sup>1</sup>, П. Е. Шимкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «АЭРОКОН», Жуковский, 140180, Россия  
E-mail: m.baboki57@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия  
E-mail: shimkinpy@mpei.ru

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. 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. Рассматриваемый в работе томографический РСА (ТРСА) позволяет производить оперативную четырёхмерную оценку за один проход носителя без необходимости во второй приёмной антенне. Описывается алгоритмическая реализация многомерной обработки парных сигналов, проверка и отладка которой осуществлены по реальным радиолограммам. 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. Продемонстрирована 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.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА), томографический РСА, многомерная обработка сигналов, сложная земная поверхность, результаты эксперимента

Одобрена к печати: 21.03.2023  
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59

### Введение

При построении современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) мониторинг с применением радиолокационных томографических методов с борта аэрокосмических аппаратов рассматривается как один из самых перспективных, существенным образом повышающий их информативность за счёт преимуществ многопозиционности и открывающий новые возможности многомерной обработки сигналов с извлечением пространственно-разностно-фазовой информации, заключённой в отражённых от Земли эхо-сигналах (Бабокин, 2010; Верба и др., 2010; Захаров, 2012; Кондратенков, Фролов, 2005; Школьный и др., 2008).

Внедрение томографии с применением радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) открыло путь к совершенно новому подходу исследования Земли. Томографический мониторинг требует наблюдения под разными углами места (по высотной координате) для формирования набора (банка) данных, содержащего несколько комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) одного и того же участка на поверхности Земли. Затем данные «фокусируются» с помощью цифровой фазовой коррекции на этапе многомерной обработки сигналов для получения четырёхмерной оценки, представляющей так называемый воксель

(3D-пиксель) РЛИ с разрешением по дальности, азимуту и высоте, характеризующий мощность объёмного рассеяния от наблюдаемой среды (Fornaro, Pascazio, 2014; Fornaro et al., 2005; Khoshnevis, Ghorshi, 2020; Mariotti, Tebaldini, 2019; Ponce et al., 2016).

Применение томографических РСА (ТРСА) в настоящее время продемонстрировано немногочисленными исследовательскими группами, в основном из Италии, Германии и Франции, а также отдельными учёными в различных прикладных контекстах. Так, например, в высокорейтинговом журнале *Remote Sensing* (Q1) для публикации результатов исследований по данному направлению специально выделен отдельный раздел ([https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special\\_issues/SAR\\_Tomography](https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/SAR_Tomography)). Они включают в первую очередь демонстрацию оценки с помощью ТРСА характеристик внутренней структуры природных сред, таких как лесные массивы, снег, ледяные массивы и ледники, что выходит далеко за рамки возможностей традиционных методов радиовидения, результатом которых служат РЛИ, получаемые с помощью РСА и/или интерферометрических (ИРСА) и поляриметрических РСА (Баскаков и др., 2011; Волосюк, Кравченко, 2008; Козлов и др., 2007; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Richards, 2022). Кроме того, томографические методы в РСА были продемонстрированы для отслеживания временных изменений недр природных сред, а также для обеспечения повышенной чувствительности к био- и геофизическим параметрам.

Целью настоящей работы стало обоснование возможности томографического наблюдения Земли на базе космического однопроходного РСА, работающего в режиме переднебокового обзора (Бабокин и др., 2014; Шимкин, 2018; Шимкин и др., 2017; Ka et al., 2019) и потенциально обладающего относительно высокой оперативностью получения информации и повышенной помехозащищённостью, а также демонстрация первых результатов экспериментальной обработки радиоголограмм, полученных в ходе лётных испытаний ТРСА.

## Математическая модель томографического наблюдения

Однопроходный способ построения РСА-томографа реализуется при многосеансной съёмке (как минимум три сеанса наблюдения) с применением одного космического аппарата (КА) с РСА при скошенном обзоре, когда комплексное изображение одного участка поверхности Земли формируется несколько раз в пределах одного рабочего участка орбиты. Излучение и приём сигналов на одном борту КА с РСА позволяет значительно снизить требования к навигационному обеспечению и синхронизации, что в случае томографического построения имеет принципиальное значение, а благодаря гибкости наземной обработки можно формировать переменное пространственное разнесение приёмных апертур (интерферометрическую базу) и реализовывать несколько циклов наблюдения с их последующей комплексной обработкой для осуществления многомерных томографических измерений.

На *рис. 1* (см. с. 51) представлена геометрическая схема однопроходного космического ТРСА при переднебоковом обзоре. Пространственное разнесение приёмных апертур обеспечивается за счёт естественного перемещения КА при движении с путевой скоростью  $V$ . Наблюдение земной поверхности ведётся при отклонённом угле наблюдения  $\alpha_0$  ( $\alpha_0 = 0$  — строго боковой обзор). Через определённый 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.

Специфика томографических измерений требует более одной пары высококоррелированных сигналов, а в связи с тем, что в одном элементе РСА может оказаться несколько объектов (см. *рис. 1*), 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 можно 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.

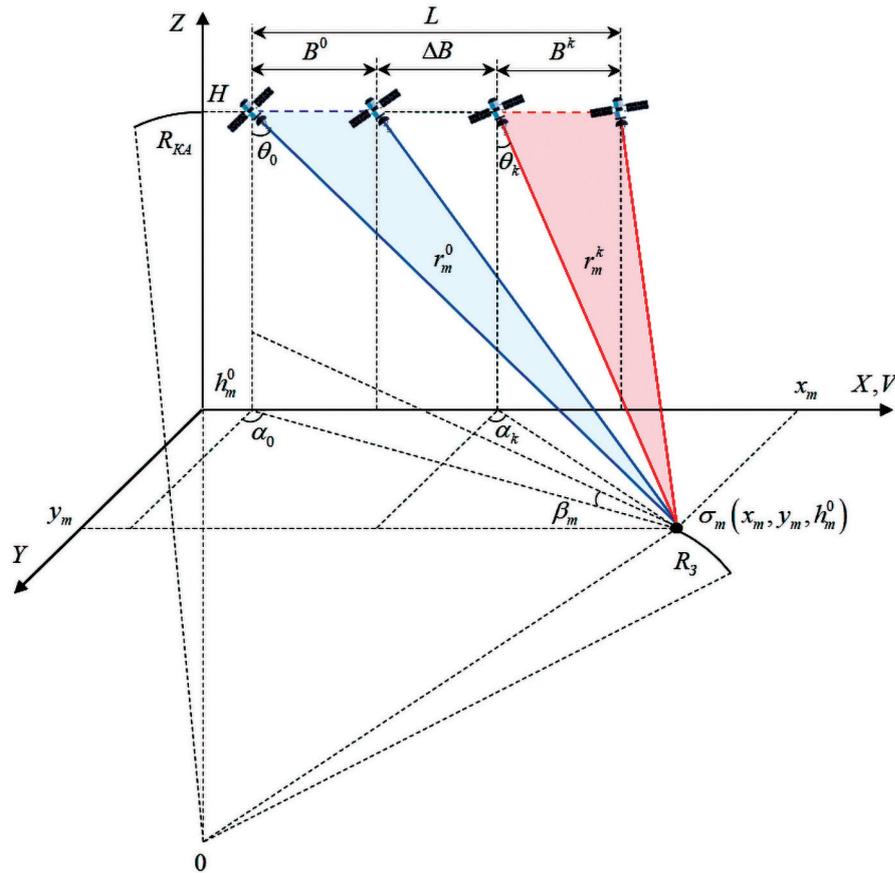


Рис. 1. Геометрия визирования ТРСА-комплекса космического базирования

В представленном на рис. 1 случае изменение текущего расстояния от фазового центра антенны (ФЦА) РСА до центра  $m$ -й полосы разрешения исследуемого участка ровной поверхности определяется следующим образом (на каждом из  $k = 0 \dots K$  циклов формирования парных сигналов для интерферометрических измерений):

$$\left. \begin{aligned} r_m^k(t) &\approx r_m^0 \left[ 1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_k}{2} \right] - V t \sin \alpha_k \cdot \sin \theta_m + \frac{(V \cos \alpha_k \cdot \sin \theta_m)^2}{2r_m^k(0)} t^2, \\ r_m^k(t + T_0) &\approx r_m^k(t) - B \sin \alpha_k \cdot \sin \theta_m + \frac{(V \cos \alpha_k \cdot \sin \theta_m)^2}{r_m^k(0)} T_0 t, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $t = 0 \dots T_C$  — время синтезирования апертуры по азимуту;  $r_m^0 = R_3 \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}$  — проекция начальной дальности;  $\alpha_k = \arcsin \left[ \frac{X_0 - k \Delta B}{r_m^k(0) \sin \theta_m} \right]$  — угол отклонения синтезированного луча от нормали к линии пути в  $k$ -м цикле;  $X_0$  — начальное смещение КА вдоль линии пути;  $\Delta B > B$  — расстояние между участками парного измерения;  $\theta_m$  — угол визирования;  $\beta_m = \arccos \left[ \left( 1 + \frac{H}{R_3} \right) \sin \theta_m \right]$  — угол скольжения;  $V \approx \sqrt{(V_{\text{ОРБ}} - V_{3Э} \cos \gamma_0)^2 + 0,5 V_{3Э}^2 \sin^2 \gamma_0}$  — путевая скорость;  $V_{3Э}$  — скорость вращения Земли на экваторе;  $V_{\text{ОРБ}} = \sqrt{\frac{f_m}{R_{\text{КА}} + H}}$  — орбитальная скорость;  $R_{\text{КА}}$  — радиус орбиты КА;  $H$  — высота круговой орбиты над поверхностью Земли;  $R_3 = 6,371 \cdot 10^6$  м — средний радиус Земли;  $f_m = 398\,600 \text{ км}^2 \cdot \text{с}^{-2}$  — геодезическая гравитационная постоянная;  $\gamma_0$  — угол наклона орбиты.

Рельеф местности влияет в каждой паре и на каждом цикле на текущее расстояние (1):

$$\left. \begin{aligned} r_m^k(t, h) &\approx r_m^k(t) - Vt \sin \alpha_k \cdot \sin(\theta_m + \Delta\theta^h), \\ r_m^k(t + T_0, h) &\approx r_m^k(t, h) - h_m \frac{B}{R_3} \sin \alpha_k \cdot \sin \theta_m, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Delta\theta^h = \frac{h_m}{R_3} \operatorname{tg} \theta_m$  — изменение угла места вследствие рельефа поверхности Земли.

Интерес представляет разность составляющих выражения (2):

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

где  $\Delta r_m^k$  — изменение дальности в парных сеансах наблюдения.

Следует отметить, что часть выражения (3) в квадратных скобках не зависит от высоты и состоит из постоянного сдвига, линейно меняющегося во времени. В технике РСА это означает: два парных сигнала будут иметь не только фазовый сдвиг, но и смещение по частоте даже при наблюдении ровной поверхности. Поэтому парные сигналы должны быть искусственно «приведены» к одному моменту времени (фазовая коррекция) с компенсацией «ровной» поверхности (второе слагаемое выражения (2) в квадратных скобках) согласно (4) индивидуально для каждого  $k$ -го интервала интерферометрического измерения:

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

где  $\Delta \bar{\varphi}_m^k$  — компенсируемая разность фаз вследствие одновременных наблюдений.

Вторая же составляющая выражения зависит от высоты объекта и служит той самой информационной составляющей для ТРСА:

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

где  $\Delta \hat{\varphi}_m^k$  — информационная фазовая составляющая ТРСА.

## Принцип обработки многомерных парных сигналов

Итак, для разрешения объектов по дальности используется зондирование поверхности широкополосными когерентными импульсными сигналами с последующим приёмом и согласованной обработкой. Для разрешения объектов по азимуту используется техника РСА с искусственным синтезированием луча по азимуту. Для разрешения объектов по высоте, когда они (см. рис. 1) находятся на разных высотах, но оказались в одном элементе разрешения по азимуту и дальности, предлагается использовать несколько позиций на одной орбите КА с повторением парных сеансов наблюдения сложной земной поверхности при скошенном обзоре. Повторные парные сеансы наблюдения следуют со сдвигом  $\Delta B$ , размер которого может быть даже больше самого интервала синтезирования  $L = VT_c$ , что значительно расширяет суммарную базу интерферометра, а также позволяет разрешать объекты по высоте.

Рассмотрим подробнее выражение (4) для РЛС с длиной волны  $\lambda = 9$  см. Итак, при  $B = 4 \dots 6$  км,  $\Delta B = 4B = 16 \dots 24$  км,  $r_m^k(0) \approx 1000$  км и высоте местного рельефа  $h_m \approx 250$  м фазовое отклонение в соседних циклах измерения составит порядка  $\delta\varphi_m = \Delta \hat{\varphi}_m^k - \Delta \hat{\varphi}_m^{k-1} \approx 40 \dots 80^\circ$ . При наличии не менее 4–6 интервалов совместных измерений этого будет вполне достаточно для того, чтобы проводить спектральный или томографический анализ по высотам нахождения объектов из ряда комплексных РЛИ.

На *рис. 2* схематично представлена томографическая обработка однопроходного космического комплексного РСА при скошенном обзоре, на которой приняты следующие условные обозначения: РЛИ<sub>*k*</sub> — блок формирования двухмерного комплексного РЛИ в *k*-м сеансе наблюдения; КРФ<sub>*k*</sub> — блок компенсации разности фаз в *k*-м сеансе наблюдения согласно (4); ИРФ<sub>*k*</sub> — блок расчёта интерферометрической разности фаз между парой комплексных РЛИ в *k*-м и (*k*−1)-м сеансах наблюдения; *C<sub>h</sub>* — результат томографической обработки в виде слоя на заданной высоте *h*.

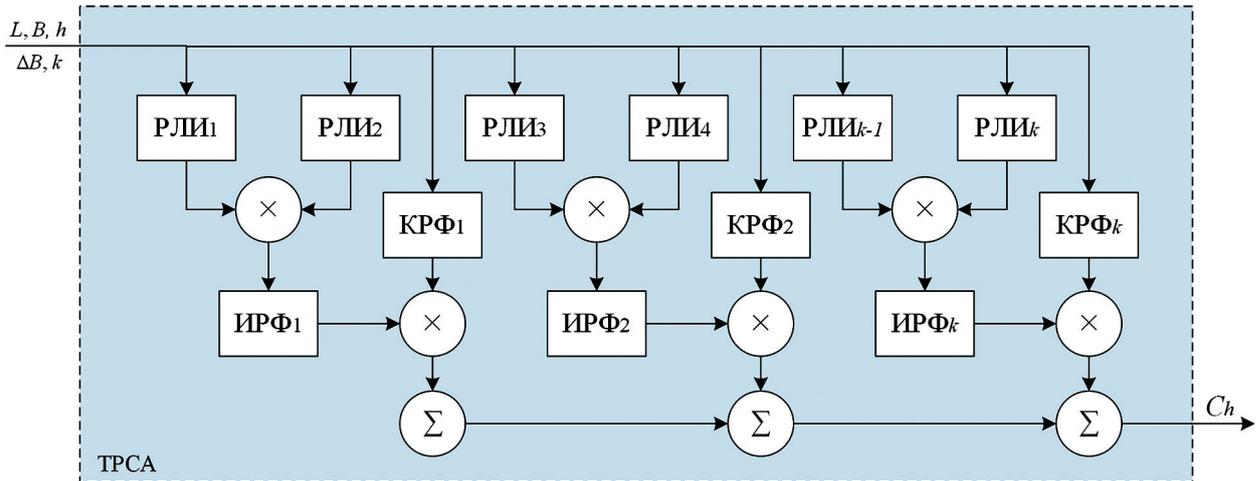


Рис. 2. Схематическое представление томографической обработки сигналов

Сначала следует традиционная двумерная обработка сигналов в РСА для прожекторного или маршрутного режимов наблюдения. После этого на первом этапе формируется интерферометрическая пара из комплексных РЛИ с высокой пространственно-временной корреляцией, а затем их комплексное сопряжение. Через интервал  $\Delta B > B$  формируется вторая пара комплексных РЛИ с высокой пространственно-временной корреляцией и последующим комплексным сопряжением. И так далее.

Количество интервалов обработки парных сигналов определяется тактическими ограничениями и допустимыми геометрическими искажениями. При скошенности обзора не более единиц градусов таких интервалов можно сформировать не более 3–6. При большем отклонении луча антенны их можно сформировать значительно больше. Связано это с тем, что количество интервалов, а скорее весь суммарный интервал томографических измерений, определяет разрешение по высоте.

Итак, после получения ряда комплексных результатов сопряжения требуется их дальнейшая фазовая коррекция  $\Delta\hat{\phi}_m^k$  на определённую высоту для последующего суммирования. Если сигналы соответствуют этой фазовой коррекции, а значит относительной высоте рельефа, они суммируются синфазно и в результате достигается максимум, если же нет, они суммируются не синфазно или даже противофазно.

### Экспериментальная проверка работоспособности

В соответствии со схемой, изображённой на *рис. 2*, были обработаны реальные радиолограммы, полученные в ходе лётных экспериментов двух КА с РСА (Бабокин и др., 2017; Rosenqvist et al., 2007), работающих на центральной длине волны  $\lambda = 9$  см (*рис. 3а*, см. с. 54) и  $\lambda = 24$  см (*рис. 3б*). Результатом становятся множественные пары комплексных РЛИ, амплитуды которых показаны на вышеуказанных рисунках, и фазовые портреты выборочных слоёв с помощью томографической обработки, показанных на *рис. 4* и *5* (см. с. 54, 55).

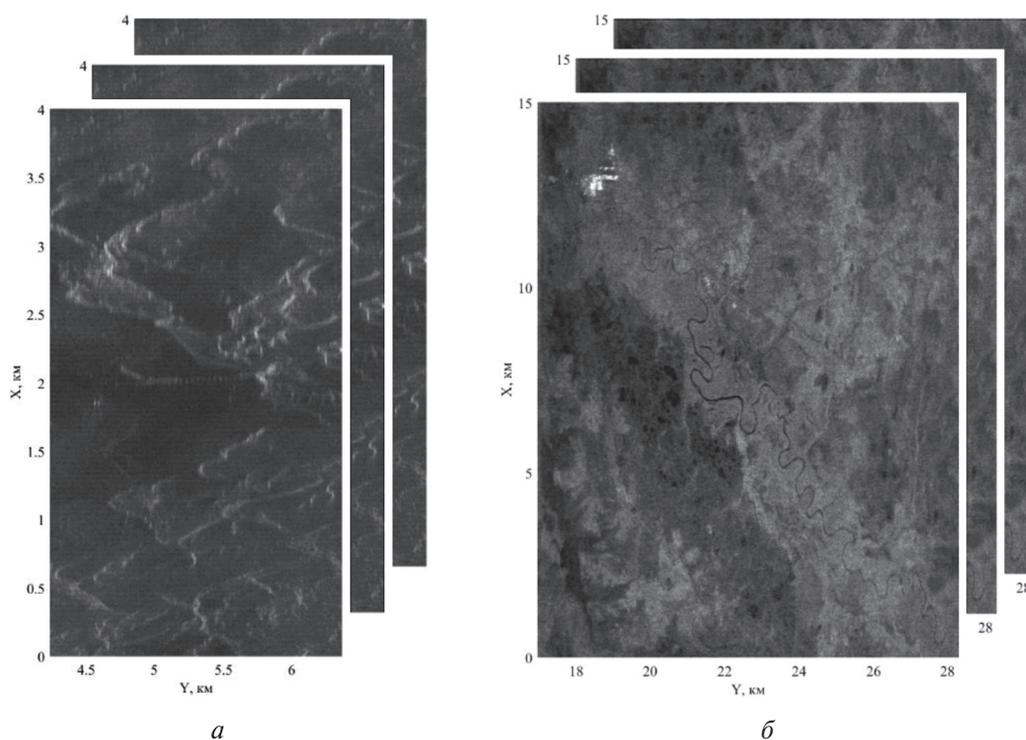


Рис. 3. Амплитудные РЛИ, полученные во множественных сеансах наблюдения: *а* — район вблизи ГЭС Гранд-Кули; *б* — район гористой местности Сихоте-Алиньской гряды

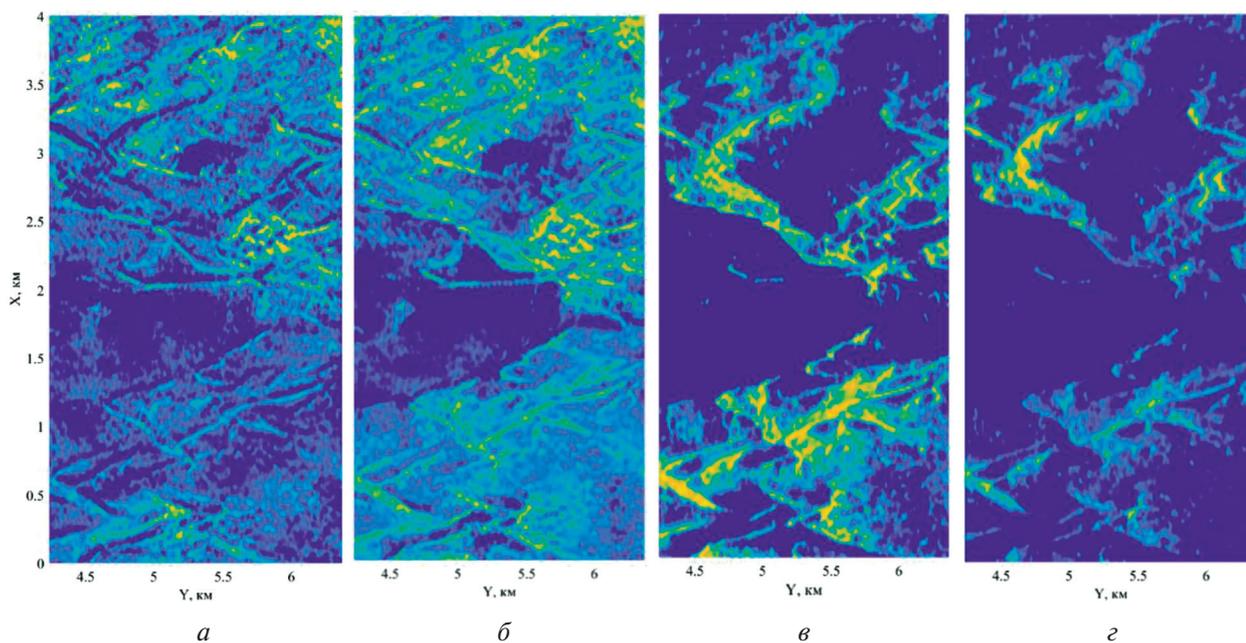


Рис. 4. Результаты обработки сигналов в ТРСА района вблизи ГЭС Гранд-Кули: *а* — слой  $C_{-2}$ ; *б* — слой  $C_{-1}$ ; *в* — слой  $C_0$ ; *г* — слой  $C_{+1}$

Диапазон отклонений синтезированного луча и в первом, и во втором случае —  $\alpha_k = 0,5...2,5^\circ$ . На одном участке полёта сформированы по четыре парных комплексных измерения через интервал  $\Delta B = 3B \approx 9$  км при  $B \approx 3$  км. Всего участок томографического измерения составил  $L \approx 36$  км. И в первом, и во втором случае показаны «высотные» слои с фазовыми портретами:  $C_0 = \arg(C_0)$ ,  $C_1 = \arg(C_1)$  и т. д. Диапазон представления каждого фазового портрета пропорционален  $0...л$ . Фазовый портрет  $C_0$  согласован со средней высотой местного

рельефа. Для следующих портретов согласованная высота менялась с шагом  $\Delta h = 50$  м. К сожалению, разрешающая способность по высоте для данного построения комплекса РСА составила около сотни метров, а этого недостаточно для того, чтобы «заглянуть», например, внутрь структуры лесного массива и оценить возможности однопроходного переднебокового ТРСА. Для этого необходимо увеличивать азимутальный угол отклонения до значений  $\alpha_k > 5...10^\circ$ .

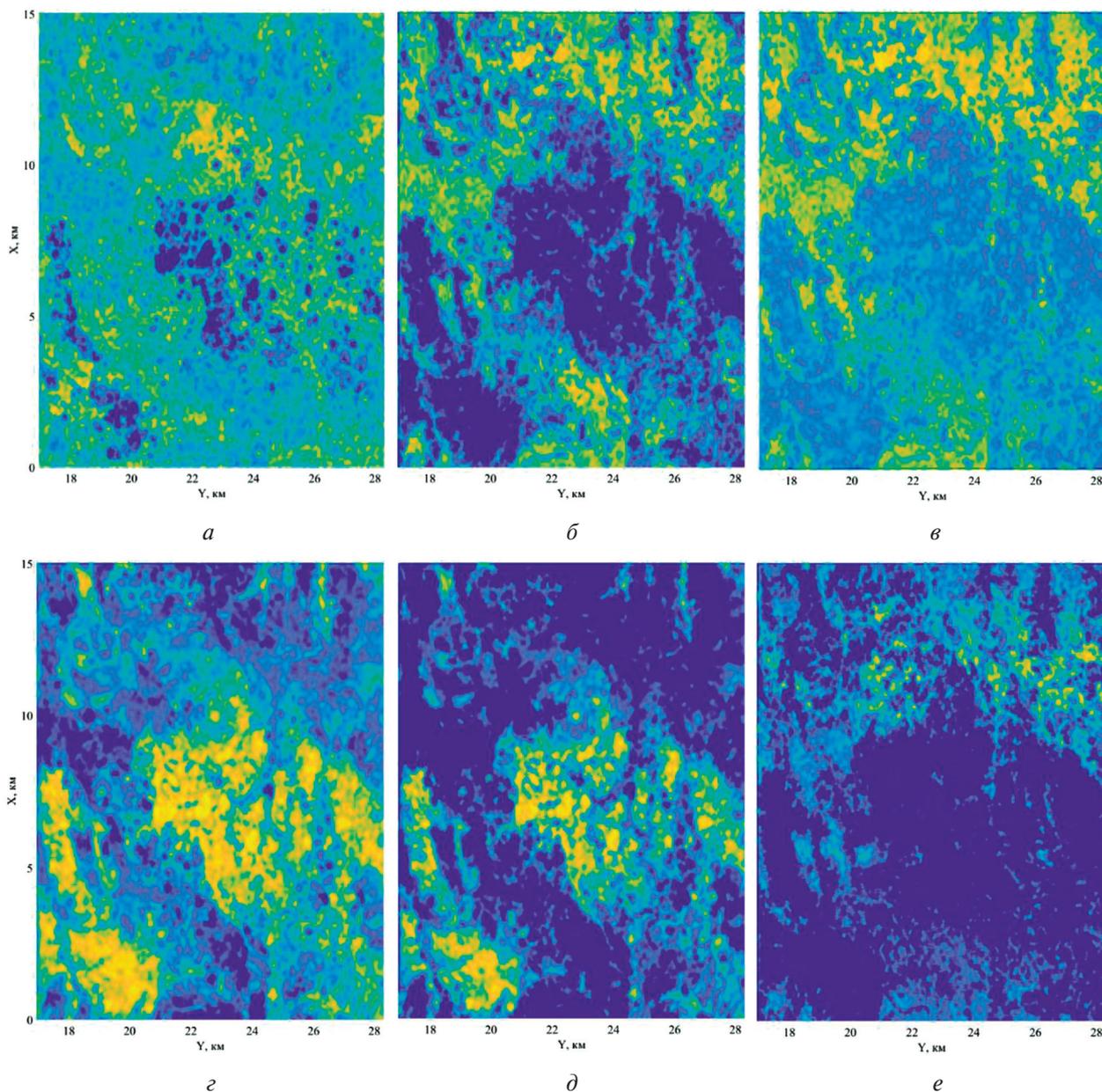


Рис. 5. Результаты обработки сигналов в ТРСА гористой местности Сихоте-Алиньской гряды:  
 а — слой  $C_{-3}$ ; б — слой  $C_{-2}$ ; в — слой  $C_{-1}$ ; г — слой  $C_0$ ; д — слой  $C_{+1}$ ; е — слой  $C_{+2}$

В первом случае можно видеть РЛИ и фазовые слои гористой местности вблизи гидроэлектростанции (ГЭС) Гранд-Кули (США, *англ.* Grand Coulee) с перепадами высот местного рельефа до 2–2,5 км. Интересно сравнить фазовые слои: базовый слой  $C_0$  и слой  $C_{+1}$ , согласованный с высотой на 400 м выше базового. Видим, что происходит выделение мощного подковообразного хребта, для которого эта высота представляется согласованной. Остальные, за исключением отдельных участков, начинают «проседать» относительно базового. Сравнение

слоёв  $C_0$  и  $C_{-1}$  даёт больше информации о предгорьях. А вот слой  $C_{-2}$  характеризует местный рельеф около ровной поверхности. Проявляется даже бурное движение воды после сброса ГЭС.

Относительно наглядным для томографического анализа представляется второй случай с более низкочастотным диапазоном —  $\lambda = 24$  см. На *рис. 5* (см. с. 55) представлены фазовые слои гористой местности Сихоте-Алиньской гряды с перепадами высот местного рельефа до 500–1000 м. Заметные процессы происходят в ряду увеличения согласованной высоты относительно базовой  $C_0$ ,  $C_{+1}$ ,  $C_{+2}$ . Заметим, что в слое  $C_{+2}$  (разность — 200 м) «вспыхнул» один участок (ячеисто-пористая структура в верхней части *рис. 5e*), хотя в слое  $C_{+1}$  этот же участок выглядел бледно. Это говорит либо о многослойности, либо о движении на поверхности в отмеченном участке. Также примечательны ещё два слоя, но уже с понижением согласованной высоты. На базовом слое  $C_0$  этот же участок — самый яркий (максимальная высота рельефа в центральной части рисунков), на слое  $C_{-2}$  он «обнулится», но уже на следующем слое  $C_{-3}$  вспыхнул снова. Видимо, в формировании этого явления приняли участие и многослойность поверхности, и особенности проникновения волн дециметрового диапазона.

## Заключение

Для повышения возможностей современных систем ДЗЗ томографические измерения космическими комплексами РСА требуют новых научных и технических решений. Одним из возможных путей дальнейшего развития средств ДЗЗ представляется разработка комплексов РСА с одновременным формированием многомерных парных сигналов, которым и представляется ТРСА.

В работе рассмотрены особенности построения и основные характеристики ТРСА с оперативным получением информации и с одновременным формированием ряда многомерных парных сигналов на одной траектории КА. На примере выборочных РСА двух диапазонов длин волн продемонстрировано экспериментальное подтверждение работоспособности однопроходного ТРСА при скошенном обзоре по реальным сигналам РСА.

## 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., Ефимов А. В., Карнов О. А., Титов М. П.* Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // *Радиотехника*. 2014. № 7. С. 16–20.
3. *Бабокин М. И., Ефимов А. В., Зайцев С. Э., Карнов О. А., Савосин Г. В., Титов М. П., Толстов Е. Ф., Турук В. Э., Цветков О. Е.* Космический аппарат «Кондор-Э» с РСА и его возможности // *Исслед. Земли из космоса*. 2017. № 3. С. 85–95. DOI: 10.7868/S0205961417030010.
4. *Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И.* Локационные методы исследования объектов и сред: учеб. для студентов высш. проф. образования / под ред. А. И. Баскакова. М.: Изд. центр «Академия». 2011. 384 с.
5. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под общ. ред. Вербы В. С. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. *Волосюк В. К., Кравченко В. Ф.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
7. *Захаров А. И.* Методы дистанционного зондирования Земли радарными с синтезируемой апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2012. 370 с.
8. *Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А.* Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 520 с.
9. *Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под. ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
10. *Шимкин П. Е.* Однопроходный бортовой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой антенны переднебокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 140 с.

11. Шимкин П. Е., Бабокин М. И., Баскаков А. И. Исследование точности однопроходного передне-бокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 103–112. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112.
12. Школьный Л. А., Толстов Е. Ф., Детков А. Н. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учеб. для курсантов ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского / под ред. Л. А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского. 2008. 531 с.
13. 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.
14. Fornaro G., Lombardini F., Serafino F. Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 4. P. 702–714. DOI: 10.1109/TGRS.2005.843567.
15. 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.
16. 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.
17. Mariotti M., Tebaldini S. Digital Terrain Model Retrieval in Tropical Forests Through P-Band SAR Tomography // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. No. 9. P. 6774–6781. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2908517.
18. 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.
19. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. V. 5. No. 2. P. 716–807.
20. 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.
21. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. N. Y.: McGrawHill, 2022. 513 p.
22. Rosenqvist A., Shimada M., Ito N., Watanabe M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 11. P. 3307–3316. DOI: 10.1109/TGRS.2007.901027.

## Application of space-based SAR in single-pass squint mode in Earth tomographic study

M. I. Babokin<sup>1</sup>, P. E. Shimkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC AEROCN, Zhukovsky 140180, Russia  
E-mail: m.baboki57@mail.ru

<sup>2</sup> National Research University “Moscow Power Engineering Institute”  
Moscow 111250, Russia  
E-mail: shimkinpy@mpei.ru

Construction features and main characteristics of a tomographic complex based on a single-position space radar with synthetic aperture radar (SAR) operating in the single-pass squint Earth observation mode are considered. The operating conditions and requirements for information support of the multichannel signal processing system are determined. The operability of the proposed approach using real signals of two wavelength ranges obtained during experimental flights was tested. The tomographic SAR (TSAR) under consideration makes it possible to perform a rapid four-dimensional assessment during one pass of the carrier, without using a second receiving antenna. The algorithmic implementation of paired signals multidimensional processing is described, the verification and debugging of

which was carried out using real radio holograms. The feature of this TSAR construction is the possibility to use one increased synthesis interval, with a division into sub-intervals to enable spatial diversity of multi-pair receiving apertures, in the implementation of multi-dimensional phase-difference radar measurements. The possibility demonstrated to use the proposed construction design of the tomographic complex with SAR in solving tasks related to obtaining additional information on the state of the Earth's surface. This paper presents the first experimental results of imaging the layered inhomogeneities of the underlying surface by using multidimensional phase-difference processing of paired signals from a single-pass SAR operating in squint mode.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), tomographic SAR, multidimensional signal processing, complex earth surface, experimental results

Accepted: 21.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59

## References

1. Babokin M. I., *Aviatsionnye i kosmicheskie komplekсы distantsionnogo zondirovaniya Zemli s interferometricheskoi obrabotkoi mnogomernykh signalov: Diss. dokt. tekhn. nauk* (Aviation and space complexes for remote sensing of the Earth with interferometric processing of multidimensional signals, Dr. techn. sci. thesis), Moscow, 2010, 336 p. (in Russian).
2. Babokin M. I., Efimov A. V., Karpov O. A., Titov M. P., Single-pass interferometer with anterolateral review, *Radiotekhnika*, 2014, No. 7, pp. 16–20 (in Russian).
3. Babokin M. I., Efimov A. V., Zaitsev S. E., Karpov O. A., Savosin G. V., Titov M. P., Tolstov E. F., Turuk V. E., Tsvetkov O. E., The Condor-E spacecraft with SAR and its capabilities, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 3, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961417030010.
4. Baskakov A. I., Zhutyaeva T. S., Lukashenko Yu. I., *Lokatsionnye metody issledovaniya ob'ektov i sred* (Location methods for studying objects and environments), A. I. Baskakov (ed.), Moscow: Izd. tsentr "Akademiya", 2011, 384 p. (in Russian).
5. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based radar systems for land survey), Verba V. S. (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p. (in Russian).
6. Volosyuk V. K., Kravchenko V. F., *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* (Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar), V. F. Kravchenko (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2008, 704 p. (in Russian).
7. Zakharov A. I., *Metody distantsionnogo zondirovaniya Zemli radarami s sinteziruemoi aperturoi: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Earth remote sensing methods with synthetic aperture radars, Dr. phys. math. sci. thesis), Moscow, 2012, 370 p. (in Russian).
8. Kozlov A. I., Logvin A. I., Sarychev V. A., *Polyarizatsiya radiovoln. Kn. 2. Radiolokatsionnaya polyarimetriya* (Polarization of radio waves. Book 2. Radar polarimetry), Moscow: Radiotekhnika, 2007, 520 p. (in Russian).
9. Kondratenkov G. S., Frolov A. Yu., *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision, Radar systems for remote sensing of the Earth), G. S. Kondratenkov (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p. (in Russian).
10. Shimkin P. E., *Odnoprophodnyi bortovoi interferometricheskii radiolokator s sintezirovannoi aperturoi anteny perednebokovogo obzora dlya otsenki rel'efa podstilayushchei poverkhnosti: Diss. kand. tekhn. nauk* (Single-pass airborne interferometric radar with a synthetic aperture antenna with squint spotlight mode for assessing the relief of the underlying surface, Cand. techn. sci. thesis), Moscow, 2018, 140 p. (in Russian).
11. Shimkin P. E., Babokin M. I., Baskakov A. I., A Study of Accuracy of Single-pass Interferometric Synthetic Aperture Radar with Front-side view for Measuring the Earth's Surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 103–112 (in Russian).
12. Shkolnyi L. A., Tolstov E. F., Detkov A. N., *Radiolokatsionnye sistemy vozduшной razvedki, deshifrirovaniye radiolokatsionnykh izobrazhenii* (Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images), L. A. Shkolny (ed.), Moscow: Izd. VVIA imeni prof. N. E. Zhukovskogo, 2008, 531 p. (in Russian).
13. Fornaro G., Pascazio V., SAR interferometry and Tomography. Theory and Applications, *Academic Press Library in Signal Processing*, 2014, Vol. 2, pp. 1043–1117, DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.
14. Fornaro G., Lombardini F., Serafino F., Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 4, pp. 702–714, DOI: 10.1109/TGRS.2005.843567.

15. 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, Vol. 11, No. 9, Art. No. 1070, DOI: 10.3390/rs11091070.
16. Khoshnevis S. A., Ghorshi S., A tutorial on tomographic synthetic aperture radar methods, *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, Art. No. 1504, DOI: 10.1007/s42452-020-03298-6.
17. Mariotti M., Tebaldini S., Digital Terrain Model Retrieval in Tropical Forests Through P-Band SAR Tomography, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, Vol. 57, No. 9, pp. 6774–6781, DOI: 10.1109/TGRS.2019.2908517.
18. 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, Vol. 1, No. 1, pp. 6–43, DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
19. Ouchi K., Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 716–807.
20. 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, Vol. 54, No. 10, pp. 6170–6196, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2582959.
21. Richards M. A., *Fundamentals of radar signal processing*, New York: McGrawHill, 2022, 513 p.
22. Rosenqvist A., Shimada M., Ito N., Watanabe M., ALOS PALSAR, A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 11, pp. 3307–3316, DOI: 10.1109/TGRS.2007.901027.