

Использования однопроходного РСА авиационного базирования для томографического исследования земной поверхности

В.В. Митрофанов¹

¹ Научно-исследовательского института приборостроения им. В.В. Тихомирова
140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, 3.
E-mail: mitrofanovvadim98@yandex.ru

Представлены основные положения организации переднебокового РСА для томографического исследования земной поверхности. Приведены результаты экспериментальной обработки сигналов.

Ключевые слова: РЛС с синтезированием апертуры, прожекторный режим, томографический РСА

The use of an aircraft-based single-pass radar for tomographic exploration of the Earth's surface

V.V. Mitrofanov¹

¹ V.V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Engineering

The main provisions of the organization of anterolateral X-ray for tomographic examination of the Earth's surface are presented. The results of experimental signal processing are presented.

Keywords: SAR, spotlight mode, TomoSar.

Введение

Развитие микроэлектроники и вычислительных возможностей современных процессоров открывает новые возможности в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ), в частности, в области построения радиолокаторов с синтезируемой апертуры антенны (РСА). Современные РСА могут формировать радиолокационные изображения (РЛИ) подстилающей поверхности с разрешающей способностью несколько метров. Эти РЛИ являются двумерными распределениями интенсивности обратного отражения облучаемой поверхности. Однако Земля трехмерная, поэтому результирующее РЛИ представляет собой лишь двумерную проекцию трехмерной сцены на плоскость “дальность-азимут” [1,2]. Это означает, что цели, лежащие на одной наклонной дальности и в одном азимутальном положении, сливаются в один пиксель.

Для извлечения информации о возвышениях рельефа используют интерферометрические РСА (ИРСА) [3]. Обработка сигналов в ИРСА заключается в нахождении разности фаз между двумя РЛИ одной и той же поверхности, полученными из слегка отличающихся траекторий синтеза апертуры. Эти разности фаз используются для определения угла отклонения от надира для каждого пикселя и, как следствие, информации о высоте. Результирующая высота пикселя связана с эффективным фазовым центром всех целей в пределах ячейки разрешения. С помощью ИРСА можно создать карту рельефа местности, но разрешить несколько целей по высоте для однобазового измерения невозможно.

Модель траекторного сигнала

реальной антенны по азимуту, $\delta R = \frac{\delta r}{\sin(\theta)}$ - разрешающая способность по



Для анализа особенностей формирования синтезированной апертуры по азимуту и углу отклонения от надира целесообразно рассмотреть плоскости X0Y и Z0R соответственно рис.2.

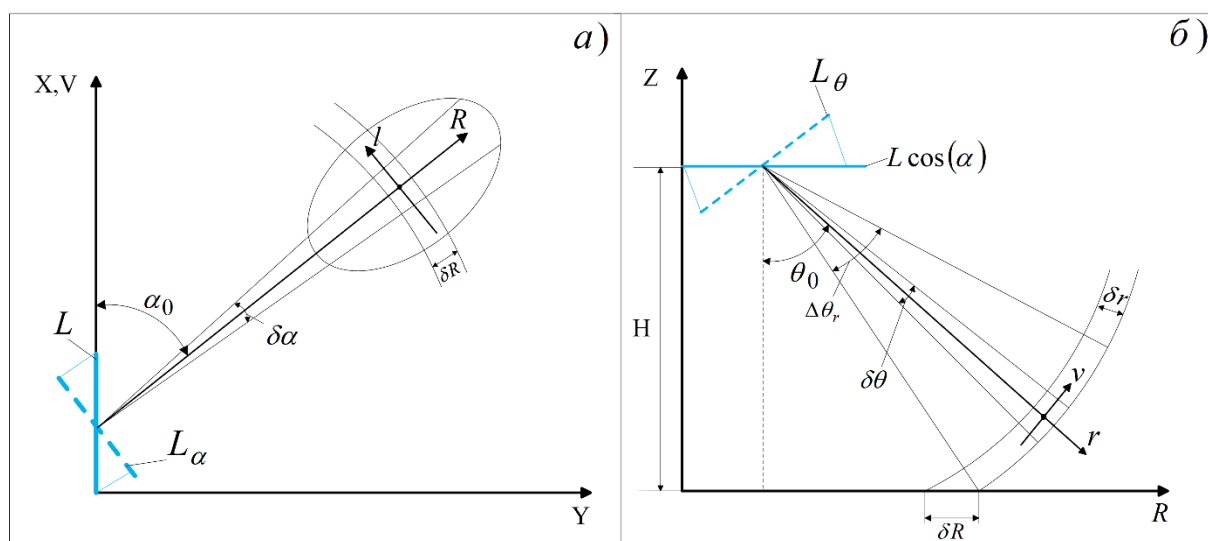


Рис. 2. Схема телескопического визирования: а) в плоскости X0Y; б) в плоскости Z0R

Эффективная длина апертуры определяется как проекция истинной длины апертуры L на нормаль к направлению визирования [1]. Для формирования разрешающей способности по азимутальной координате $\delta\alpha$ эффективная длина апертуры определяется как $L_\alpha = L \sin(\alpha)$ (рис.2 (а)). Для разрешающей способности по углу отклонения от надира $\delta\theta$ эффективная длина апертуры $L_\theta = L \cos(\alpha) \cos(\theta)$ (рис.2(б)). Именно наличие этой проекции апертуры L_θ названной в работе [5], *перпендикулярной базовой линией* и позволяет в переднебоковом однопроходном режиме визирования организовывать разрешение целей по высоте. При строго боковом обзоре L_θ появляется только в случае многих проходах носителя РЛС по параллельным траекториям на разной высоте относительно облучаемой поверхности.

Таким образом, траекторный сигнал отраженный от элементарного рассеивателя (ЭР) в прожекторном режиме визирования, можно представить в следующем виде:

$$s_i(\tau) = \dot{e}_i \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} r_i(\tau)\right) \quad (1)$$

где i – номер точечного отражателя, $r_i(\tau)$ – закон изменения наклонной дальности до ЭР, \dot{e}_i – комплексный коэффициент переотражения ЭР.

В случае прожекторного режима закон изменения наклонной дальности удобно представить в виде ряда Тейлора:

$$r_i(\tau) = \sqrt{(V\tau - x_i)^2 + y_i^2 + (H - z_i)^2} \approx r_0 - V\tau \cos(\alpha_i) \sin(\theta_i) + \frac{V^2 \tau^2 (1 - (\cos(\alpha_i) \sin(\theta_i))^2)}{2r_0} \quad (2)$$

где V – скорость носителя в направлении синтезирования апертуры, H – высота носителя на поверхность, r_0 – расстояние до эквивалентного рассеивателя в момент

времени $\tau=0$, α_i – азимутальный угол ЭР (относительно линии пути), θ_i – угол отклонения от надира ЭР (относительно линии пути), x_i, y_i, z_i – координаты ЭР.

Таким образом, информация об угле места и азимуте (после демодуляции ЛЧМ составляющей сигнала) содержится в доплеровском смещении частоты сигнала. А задача формирования топографического РЛИ формулируется, как формирования классических РЛИ “дальность – азимут” для фиксированного значения высоты z .

Целесообразно будет оценить вклад в доплеровский сдвиг частоты для азимутального смещения цели от опорной точки и вклад для смещения по вертикальной высоте.

Закон фазовой модуляции для траекторного сигнала (1):

$$\Phi_i(\tau) \approx \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta r_0(\alpha_0, \theta_0, \tau) + \Delta r_\alpha(\Delta\alpha, \tau) - \Delta r_z(\Delta z, \tau)) \quad (3)$$

где $\Delta z = (z_0 - z_i) \cdot \sin(\theta_0)$, $\Delta\alpha = (\alpha_0 - \alpha_i)$

Вклад опорной точки (центра зоны обзора рис.1) в закон изменения наклонной дальности:

$$\Delta r_0(\alpha_0, \theta_0, \tau) = r_0 - V\tau \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) + \frac{V^2 \tau^2 (1 - (\cos(\alpha_0) \sin(\theta_0))^2)}{2r_0} \quad (4)$$

Вклад азимутального сдвига в закон изменения наклонной дальности:

$$\begin{aligned} \Delta r_\alpha(\Delta\alpha, \tau) = \Delta\alpha \cdot & \left(V\tau \sin(\alpha_0) \sin(\theta_0) + \frac{V^2 \tau^2 \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) \sin^2(\theta_0)}{2r_0} \right) \\ & + \Delta\alpha^2 \left(\frac{1}{2} V\tau \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) + \frac{V^2 \tau^2 \sin^2(\theta_0) (\cos^2(\alpha_0) - \sin^2(\alpha_0))}{2r_0} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Вклад сдвига по высоте в закон изменение наклонной дальности:

$$\begin{aligned} \Delta r_z(\Delta z, \tau) = \Delta z \cdot \sin(\theta_0) \cdot & \left(V\tau \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) + \frac{V^2 \tau^2 \cos^2(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)}{Rs} \right) \\ & - (\Delta z \cdot \sin(\theta_0))^2 \cdot \left(\frac{1}{2} V\tau \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) - \frac{V^2 \tau^2 \cos^2(\alpha_0) (\cos^2(\theta_0) - \sin^2(\theta_0))}{2Rs} \right) - \Delta z \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, из уравнений (5)(6) (после демодуляции ЛЧМ) можно рассчитать ширину частотного фильтра необходимого для фильтрации угловых координат.

Ширина азимутального фильтра:

$$\Delta\omega_\alpha \approx \delta\alpha \frac{2\pi}{\lambda} V \sin(\alpha_0) \sin(\theta_0) \quad (7)$$

Ширина фильтра угла отклонения от надира:

$$\Delta\omega_z \approx \delta z \frac{2\pi}{\lambda} V \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \quad (8)$$

где $\delta\alpha, \delta z$ – разрешающая способность комплекса РСА по азимуту и вертикальной высоте.

Анализ уравнений (4)-(8) показывает, что для фильтрации двух угловых координат используется один параметр сигнала – линейный фазовый набег (доплеровская частота). Это может приводить к неопределенности (невозможности различить смещение доплеровской частоты от сдвига по азимуту и смещение от сдвига по углу отклонения от надира) или к миграции целей по азимуту. Однако обычно в реальных сценариях обзора доплеровское смещение частоты от всего диапазона сдвигов по вертикальной высоте Δz_{\max} в разы меньше ширины азимутального фильтра (7). Из этого следует важное ограничение при построении комплексов однопроводных переднебоковых томографических РСА. Необходимо, чтобы ширина спектра от всего диапазона сдвигов по углу отклонения от надира была меньше половины ширины азимутального фильтра (рис.3):

$$\Delta z_{\max} \frac{2\pi}{\lambda} V \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \leq \delta\alpha \frac{2\pi}{\lambda} V \sin(\alpha_0) \sin(\theta_0) \quad (9)$$

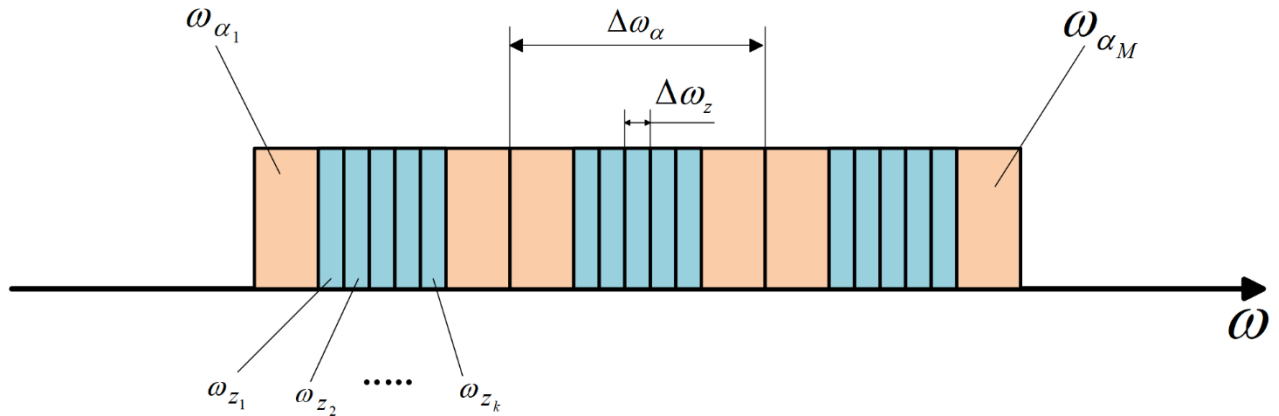


Рис. 3. Пояснения к выбору ширины фильтров

Разрешающая способность по угловым координатам из (7)(8) соответственно:

$$\delta\alpha = \frac{\lambda}{2VT_c \sin(\alpha_0) \sin(\theta_0)} \quad (10)$$

$$\delta z \approx \frac{\lambda r_0}{2VT_c \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)} \quad (11)$$

Принцип томографической обработки сигналов

Высокая разрешающая способность по наклонной дальности в РЛС достигается за счет использования широкополосных зондирующих сигналов. Разрешение объектов по азимуту достигается за счет синтеза луча по азимуту. Для разрешения объектов по высоте предлагается использовать совместную обработку нескольких комплексных РЛИ одной и той же местности, полученных на разных позициях траектории синтеза апертуры в прожекторном режиме как в работе [7], что эквивалентно синтезированию луча по углу места. Длительность каждого интервала T_{La} выбирается исходя из требуемого разрешения по азимуту $\delta\alpha$ (10). Количество сеансов K выбирается исходя из требуемого разрешения по углу отклонения от надира δz (11) с учетом того,

что общее время накопления считается как $T_c = \frac{B \cdot K + (L_a - B)}{V}$. В – это расстояние между началами сеансов наблюдения, в интерферометрических РСА эту величину называют размером “базовой линией”. L_a – это длина синтезированной апертуры в одном сеансе наблюдения.

Действительно, рассмотрим сигнал от элементарного рассеивателя в одном сеансе визирования, согласно (3):

$$s_i^k(\tau) = \dot{e}_i \exp \left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (\Delta r_0(\alpha_0, \theta_0, \tau) + \Delta r_\alpha(\Delta \alpha, \tau) - \Delta r_z(\Delta z, \tau)) \right) \quad (12)$$

Классический метод обработки траекторного сигнала предполагает устранение составляющей от опорной точки (доплеровский набег от положения луча), устранение квадратичного набега фазы (фокусировка) и согласованную фильтрацию по азимуту[2].

При учете соблюдения условия (9) и точной настройки фильтра на смещение ЭР по азимуту, сигнал на выходе обработки в одном сеансе можно записать как:

$$S_i^k = |\dot{e}_i| T_{L\alpha} \cdot \exp \left(\Delta z \cdot \sin(\theta_0) \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \left(V \left(T_b k + \frac{T_{La}}{2} \right) \cos(\alpha_0) \cos(\alpha_0) \right) \right) \quad (13)$$

Как видно, сигнал (13) имеет линейный фазовый набег от сеанса к сеансу, несущий в себе информацию о высоте объекта и описывает комплексную амплитуду пикселя комплексного РЛИ сформированного в одном сеансе наблюдения.

Таким образом, накопление нескольких комплексных РЛИ и их совместная обработка (а точнее согласованная фильтрация комплексных амплитуд пикселей, соответствующих одной наклонной дальности и одному азимутальному положению) позволяет формировать двумерные РЛИ в координатах “дальность-азимут” для различных фиксированных высот.

Экспериментальная проверка работоспособности

Проверка способа формирования томографических РЛИ проводилась путем обработки реальных голограмм, полученных с РЛС авиационного базирования, при визировании гористой местности.

Исходная голограмма, записанная в прожекторном режиме, была поделена на 4 равные части, что позволило симитировать 4 сеанса наблюдения.

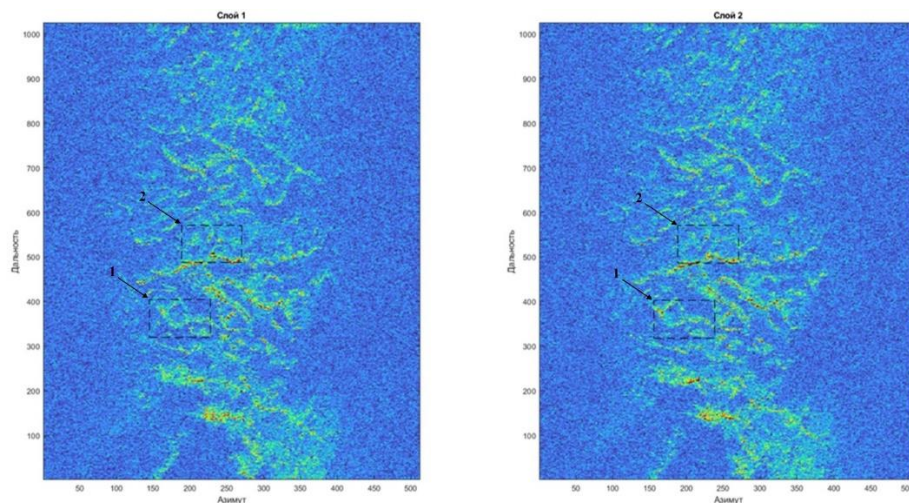


Рис. 4. Результат томографической обработки реальных голограмм (1 и 2 слой)

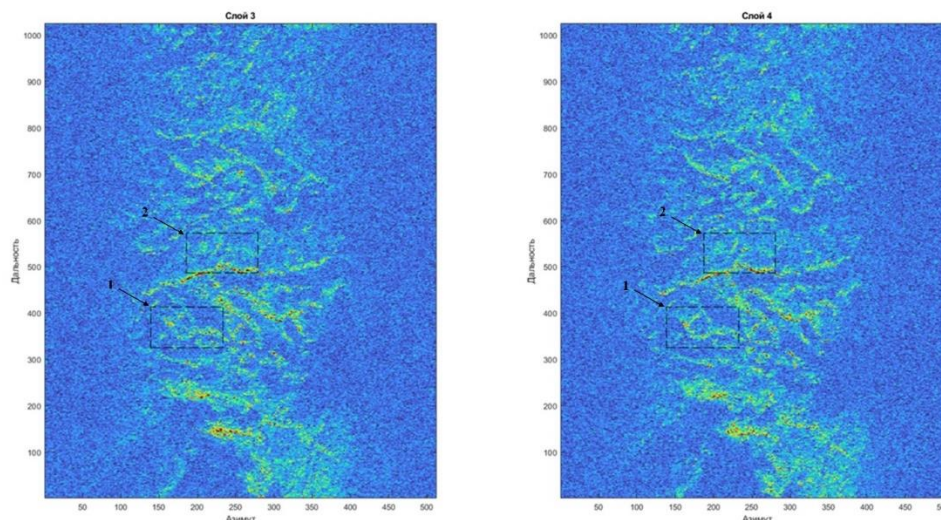


Рис. 5. Результат томографической обработки реальных голограмм (3 и 4 слой)

К сожалению, отсутствие навигационных данных о лётном эксперименте, не позволяет в полной мере оценить результаты формирования томографических РЛИ. Однако можно сравнить отдельные участки РЛИ с разных слоев и те же участки на полном РЛИ сформированном классическим методом рис.6. Для удобства сравнения, полное РЛИ суммировалось по 4 отсчета по азимутальным строкам, для приведения всех изображений к одному масштабу.

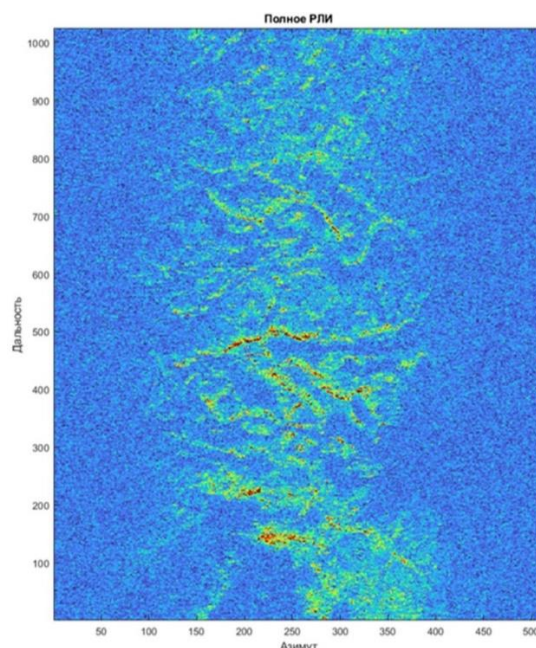


Рис.6. Полное РЛИ сформированное классическим методом

Особенно выделяется участок в центре изображения, где на слое 1 (рис.7) отчетливо выделяется склон хребта, которого не видно на других слоях. А на другом участке (рис.8) на слое 3 виден хребет, согласованный с этим слоем по высоте, на других слоях он не наблюдается. Также на каждом слое видны регулярные “яркие” структуры на одних и тех же участках, это может свидетельствовать о многослойной структуре наблюдаемой поверхности, или же о недостаточном количестве сеансов

наблюдения (“яркие” пиксели проникают во все слои по боковым лепесткам сигнальной функции).

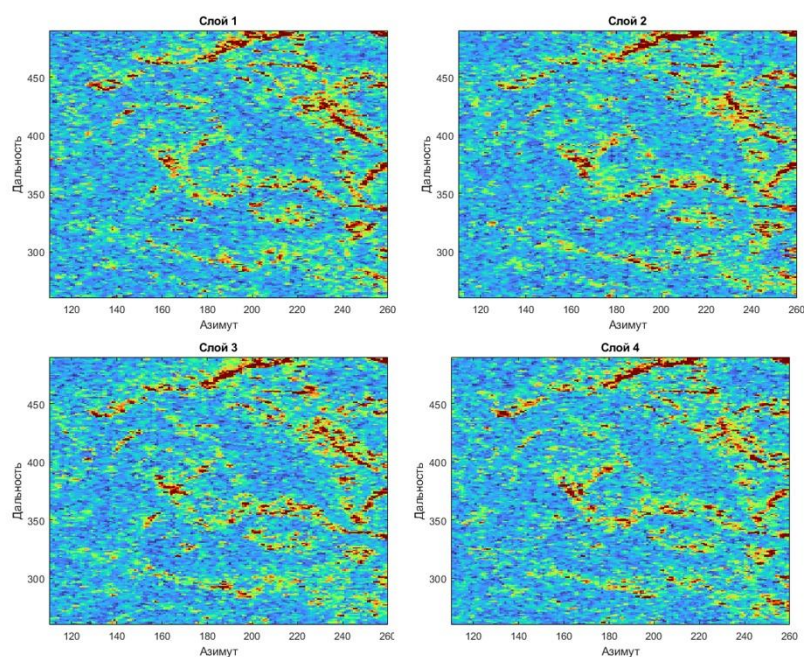


Рис.7. Первый участок в увеличенном масштабе

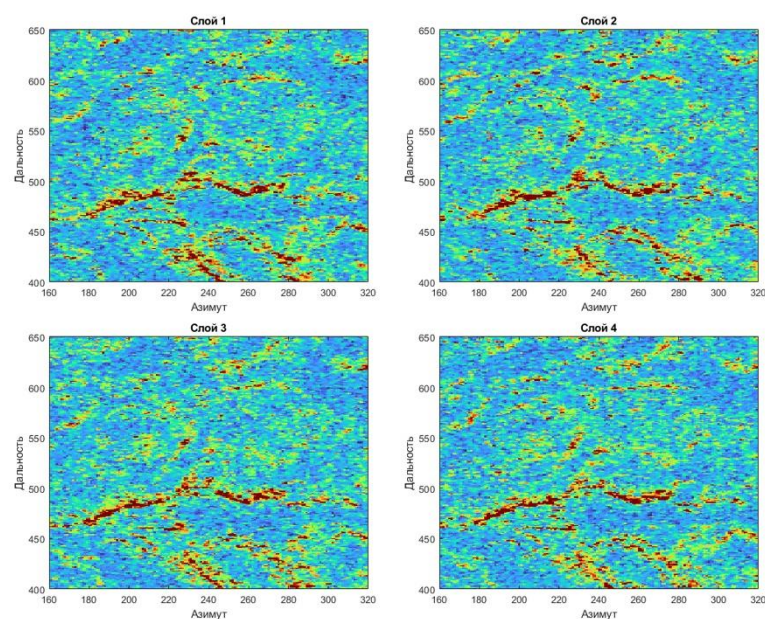


Рис. 8. Второй участок в увеличенном масштабе

Выводы

Основным направлением в развитии томографических РСА являются многопроходные системы. Однако они обладают серьезным недостатком — долгим временем формирования изображения.

В работе рассмотрены особенности построения однопроходного переднебокового комплекса томографического РСА авиационного базирования. На примере обработки реальных сигналов продемонстрирована работоспособность такого подхода.

Литература

1. Верба В. С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под общей редакцией Вербы В.С. - М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Антипов В.Н., Колтышев Е.Е., Кондратенков Г.С., А.Ю. Фролов, В.Т. Янковский. Авиационные системы радиовидения / под общей редакцией Г.С. Кондратенков. – М.: Радиотехника, 2015. 648с.
3. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. Vol. 14. P. 1-52
4. Fornaro G., Serafino F., Soldovieri F., Three-dimensional focusing with multipass SAR data. // IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 3. 2003
5. Шимкин П.Е. Однопроходный бортовой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой антенны переднебокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности: дис. ...канд. тех. наук. М.,2018. 140 с.
6. Бабокин М. И. Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра тех. наук. М., 2010. 336 с.
7. 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