

**Е. Н. Горовой, А. А. Безвесильный, Д. М. Ваврив**  
Радиоастрономический институт НАН Украины  
4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина  
E-mail: [gorovoy@rian.kharkov.ua](mailto:gorovoy@rian.kharkov.ua)

### КОРРЕКЦИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ОШИБОК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКОГО АЛГОРИТМА В РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) является эффективным инструментом для формирования изображений поверхности земли с высоким пространственным разрешением. Одним из факторов, влияющих на качество получаемых изображений, являются нестабильности полета самолета. Проблема состоит в том, что несмотря на применение общепринятой процедуры компенсации отклонений траектории, которая необходима для построения синтезированной апертуры, нестабильности ориентации реальной антенны остаются некомпенсированными. Это приводит к радиометрическим (яркостным) искажениям на изображениях. Такая проблема особенно актуальна в случае применения кадровых алгоритмов обработки данных РСА, основанных на использовании быстрого преобразования Фурье (например, дальностно-доплеровского алгоритма), которые предполагают постоянную ориентацию луча антенны в пределах больших блоков данных. В работе рассмотрен метод коррекции радиометрических искажений на радиолокационных изображениях при проведении РСА-обработки в частотной области. Идея метода основана на построении увеличенного числа РСА-взглядов, что соответствует расширению обрабатываемой полосы доплеровских частот. Показано, что расширение полосы частот позволяет компенсировать влияние двух эффектов: изменения углов ориентации антенны во времени относительно вектора скорости самолета, а также возможного дополнительного расширения полосы доплеровских частот принятых сигналов в результате применения процедуры компенсации ошибок движения. Полученное увеличенное число РСА-взглядов используется для восстановления многовзглядового РСА-изображения без радиометрических искажений. Предложенные методы коррекции радиометрических ошибок являются эффективной заменой дорогостоящей системы стабилизации реальной антенны и активно используются в действующих РСА-системах. Эффективность разработанных алгоритмов проиллюстрирована на примерах реальных радиолокационных данных. Ил. 6. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, компенсация ошибок движения, многовзглядовая обработка, радиометрические ошибки.

Базовая теория радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на борту движущейся платформы, предполагает прямолинейное равномерное движение платформы с постоянными углами ориентации луча реальной антенны. В случае реальных систем траектория движения платформы является криволинейной, а углы ориентации луча антенны изменяются во времени. В результате качество получаемых РСА-изображений может заметно ухудшаться за счет возникновения геометрических и радиометрических искажений [1–3]. Эта проблема является особенно актуальной в случае размещения радиолокаторов с синтезированной апертурой на борту легкомоторных самолетов [4–5]. Использование высокоточной навигационной системы позволяет выполнить измерения реальной траектории самолета и провести в значительной степени компенсацию геометрических искажений при построении радиолокационных изображений. Такое решение обычно оказывается недостаточным при формировании РСА-изображений с пространственным разрешением лучше 1 м. В этом случае требуется применение автофокусировки, которая позволяет оценить остаточные фазовые ошибки из анализа радиолокационного сигнала [6].

Однако даже при использовании указанных процедур компенсации ошибок движения, нестабильности ориентации луча реальной антенны остаются некомпенсированными [3, 7].

В таком случае на РСА-изображениях могут присутствовать значительные радиометрические ошибки. Далее мы покажем, что радиометрические ошибки могут быть обусловлены не только вариациями ориентации луча реальной антенны, а также применением стандартных процедур компенсации траекторных отклонений. Это становится особенно проблематичным в случае использования блочных алгоритмов РСА-обработки, в которых используются постоянные параметры обработки сигналов в течение относительно больших интервалов времени.

В нашей работе предлагается новый подход к коррекции радиометрических искажений на РСА-изображениях. Идея метода основана на использовании многовзглядового принципа формирования изображений с существенным увеличением числа РСА-взглядов по сравнению с известными алгоритмами. Для увеличения числа РСА-взглядов требуется соответствующее увеличение полосы обрабатываемых доплеровских частот. В работе мы описываем способ реализации такого алгоритма построения РСА-изображений. Его эффективность проиллюстрирована обработкой реальных данных, полученных с помощью действующего самолетного РСА, установленного на легко-моторном самолете [4–5].

**1. Дальностно-доплеровский алгоритм с компенсацией ошибок движения.** Для подавления спекл-шума и повышения уровня детализации на РСА-изображениях применяется много-

взглядовая обработка [3, 7, 8]. Ее идея состоит в построении нескольких изображений одного участка местности с разных сегментов траектории. Направление РСА-взгляда и количество РСА-взглядов определяется алгоритмом обработки сигналов и управляется в реальном времени сигнальным процессором. Важно, что для одной физической диаграммы направленности можно сформировать большое число РСА-взглядов, которые в общем могут не совпадать с направлением реальной антенны.

Одним из наиболее часто используемых алгоритмов при многовзглядовой РСА-обработке является дальностно-доплеровский алгоритм (ДДА) [9, 10]. Его основные преимущества состоят в высоком быстродействии и функциональной простоте. В ДДА многовзглядовая обработка реализуется путем деления полосы доплеровских частот на несколько частей. После применения обратного преобразования Фурье к каждой из частей формируется несколько РСА-изображений одного и того же участка сцены. Такие изображения называются РСА-взглядами. Для уменьшения уровня спекл-шума РСА-взгляды суммируются некогерентно. В случае половинного перекрытия число РСА-взглядов равно

$$NL = \text{int} \left\{ \frac{2BW_{Ant}}{BW(\rho_X)} \right\} - 1, \quad (1)$$

где  $BW_{Ant}$  – ширина полосы доплеровских частот луча реальной антенны;  $BW(\rho_X)$  – полоса доплеровских частот, необходимая для получения заданного азимутального разрешения  $\rho_X$ ;  $\text{int}\{\}$  – оператор выделения целой части. Ширина полосы доплеровских частот луча антенны определяется выражением

$$BW_{Ant} \approx \frac{2}{\lambda} V_X \theta_{Ant}. \quad (2)$$

Здесь  $\theta_{Ant}$  – ширина луча антенны;  $\lambda$  – длина волны радиолокатора;  $V_X$  – скорость самолета. Полоса доплеровских частот  $BW(\rho_X)$  и азимутальное разрешение связаны простым соотношением

$$BW(\rho_X) = K_w \frac{V_X}{\rho_X}, \quad (3)$$

где  $K_w$  – коэффициент весового окна.

Поскольку ДДА предполагает постоянные параметры обработки на фрагменте данных, то обязательным условием эффективной РСА-обработки является применение процедуры компенсации ошибок движения. Принцип такой процедуры иллюстрирует рис. 1.

Точка  $A(0, 0, H_0)$  соответствует идеальному положению самолета на опорной прямой,

точка  $A_E(\Delta x, \Delta y, H)$  – реальному положению на криволинейной траектории. Тогда ошибка наклонной дальности для синтезированного луча, направленного в точку  $P(x_P, y_P, 0)$ , будет равна

$$\Delta R_E(x_P, y_P) = R_E(x_P, y_P) - R(x_P, y_P), \quad (4)$$

где

$$R(x_P, y_P) = \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + H_0^2};$$

$$R_E(x_P, y_P) = \sqrt{(\Delta x - x_P)^2 + (\Delta y - y_P)^2 + H^2}.$$

Такая ошибка наклонной дальности соответствует фазовой ошибке

$$\varphi_E(x_P, y_P) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_E(x_P, y_P). \quad (5)$$

В процедуре компенсации траекторных отклонений производится коррекция ошибок миграции (4) и фазовых ошибок (5). В результате применения такой коррекции радиолокационные данные будут иметь вид, который соответствует движению самолета по опорной прямолинейной траектории.

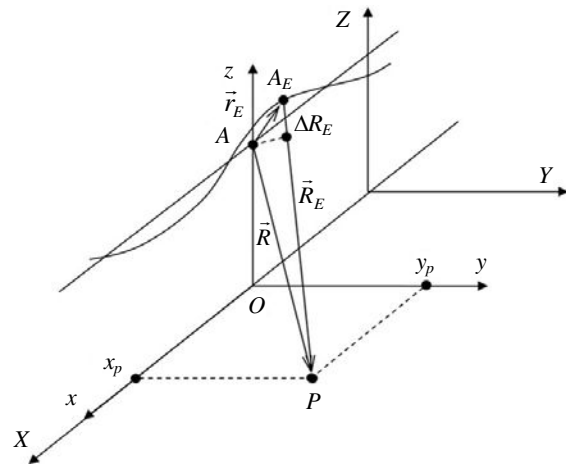


Рис. 1. Компенсация ошибок движения

Применение ДДА к данным после компенсации ошибок движения позволяет получать хорошо сфокусированные РСА-изображения. Однако проблема состоит в том, что радиометрические искажения из-за изменения углов ориентации луча антенны все равно присутствуют на изображениях. Эффективный подход к ее решению рассмотрен в разд. 2.

**2. Компенсация ошибок движения и расширение полосы доплеровских частот.** Ориентация луча антенны радиолокатора описывается с помощью углов  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 2). Эти углы определяются в локальной системе координат  $(x, y, z)$ . Ее ось  $x$  всегда направлена вдоль горизонтальной составляющей вектора скорости самолета, т. е.  $v_y = 0$ .

В таком случае центральная доплеровская частота (доплеровский центроид) определяется выражением

$$F_{DC} = \frac{2}{\lambda} \frac{x_R v_x - H v_z}{R}, \quad (6)$$

где  $x_R = H \operatorname{tg} \alpha \cos \beta + \sin \beta \sqrt{R^2 - H^2 - (H \operatorname{tg} \alpha)^2}$ . Доплеровский центроид  $F_{DC}$  (6) зависит от углов ориентации антенны  $\alpha, \beta$ , высоты полета  $H$  и наклонной дальности  $R$ .

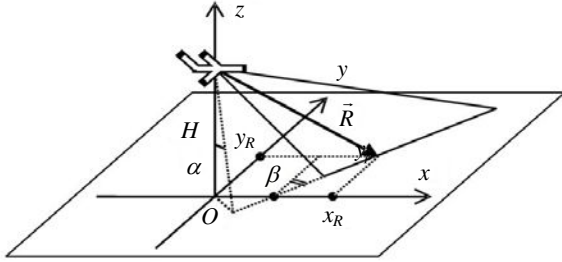


Рис. 2. Локальная система координат

После применения процедуры компенсации ошибок движения радиолокационные данные соответствуют полету по опорной прямой, однако освещение сцены остается неизменным. Для описания положения пятна антенны на поверхности земли относительно опорной прямолинейной траектории необходимо определить новые углы ориентации антенны  $\alpha_{MoCo}$  и  $\beta_{MoCo}$  (рис. 3).

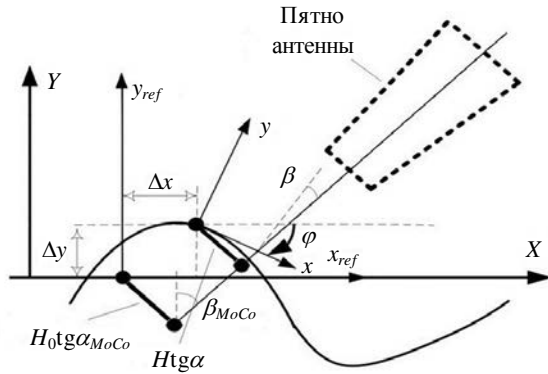


Рис. 3. Геометрия полета и плоскость земли

Используя рис. 3, можно получить связь между углами ориентации антенны

$$\beta_{MoCo} = \beta - \varphi; \quad (7a)$$

$$H_0 \operatorname{tg} \alpha_{MoCo} = H \operatorname{tg} \alpha + \Delta x \cos \beta - \Delta y \sin \beta, \quad (7b)$$

где  $H_0$  – опорная высота;  $\Delta x, \Delta y$  – траекторные отклонения самолета в горизонтальной плоскости. Угол  $\varphi$  описывает ориентацию горизонтальной компоненты вектора скорости самолета  $\vec{V}_{XY}$  от-

носительно опорной прямой. Другими словами, это угол поворота между локальной  $(x, y)$  и опорной локальной  $(x_{ref}, y_{ref})$  системами координат.

Очевидно, что значения углов  $\alpha_{MoCo}$  и  $\beta_{MoCo}$  отличаются от  $\alpha, \beta$ . Такое отличие обусловлено двумя факторами. Во-первых, траекторными отклонениями  $\Delta x, \Delta y$  и изменением высоты  $H$ . Во-вторых, изменениями направления полета, которые описываются углом  $\varphi$ . Стоит подчеркнуть, что даже в случае постоянной ориентации антенны в локальной системе координат новые углы ориентации антенны  $\alpha_{MoCo}$  и  $\beta_{MoCo}$  относительно опорной прямолинейной траектории будут изменяться. А это значит, что величина доплеровского центроида  $F_{DC}$  будет дополнительно варьироваться в результате применения процедуры компенсации ошибок движения.

Рассмотрим случай полета на постоянной высоте ( $v_z = 0$ ) в режиме строго бокового обзора ( $\alpha = 0, \beta = 0$ ) по некоторой криволинейной траектории. В таком случае значение доплеровского центроида до компенсации ошибок движения равно нулю. Тогда (7) примут вид

$$\beta_{MoCo} = -\varphi; \quad (8a)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{MoCo} = \Delta x / H_0. \quad (8b)$$

Видно, что из-за движения по криволинейной траектории ( $\varphi \neq 0$ ) после компенсации ошибок движения значения доплеровского центроида может отличаться от нуля. Если в реальных условиях полета уходы вдоль траектории невелики ( $\Delta x \ll H_0$ ), то можно получить выражение для изменения величины доплеровского центроида после компенсации ошибок движения:

$$\Delta F_{DC}^{MoCo}(R) = \frac{2}{\lambda} V_0 \sin \varphi \frac{\sqrt{R^2 - H_0^2}}{R}. \quad (9)$$

Если движение вдоль криволинейной траектории происходит со скоростью равной опорной скорости  $V_{XY} = V_0$ , то учитывая, что  $\varphi = \operatorname{arctg}(V_Y / V_X)$ , выражение (9) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\Delta F_{DC}^{MoCo}(R) = \frac{2}{\lambda} V_Y \frac{\sqrt{R^2 - H_0^2}}{R}. \quad (10)$$

Из (10) можно сделать вывод, что величина  $\Delta F_{DC}^{MoCo}(R)$  пропорциональна значению Y-компоненты скорости самолета. Рассмотренный эффект расширения полосы доплеровских частот в результате применения процедуры компенсации ошибок полета особенно проявляется в случае применения ДДА на участках с разворотами траектории.

Для компенсации изменения углов ориентации реальной антенны, а также рассмотренного эффекта дополнительного расширения полосы доплеровских частот мы предлагаем использовать увеличенное число РСА-взглядов (рис. 4).

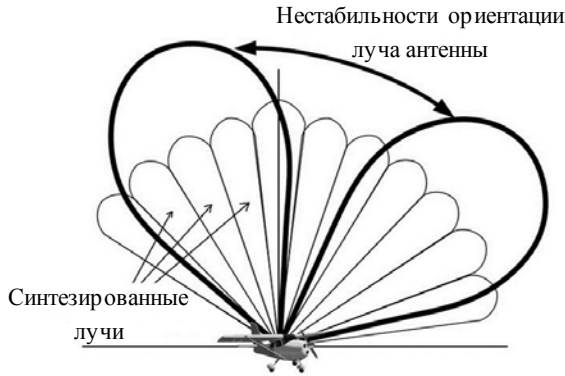


Рис. 4. РСА-обработка с расширенным числом РСА-взглядов

На рис. 4 показаны две разные ориентации луча реальной антенны, а также совокупность синтезированных лучей. Несмотря на нестабильности ориентации, некоторые синтезированные лучи все равно находятся внутри луча реальной антенны. Увеличенное число РСА-взглядов определяется следующим образом:

$$NL_{Ext} = \text{int} \left\{ \frac{BW_{Ext}}{BW(\rho_X)/2} \right\} - 1. \quad (11)$$

Здесь  $BW_{Ext}$  – величина расширенной полосы доплеровских частот, которая определяется выражением

$$BW_{Ext} = BW_{Ant} + \Delta F_{DC}, \quad (12)$$

где  $\Delta F_{DC}$  соответствует суммарному эффекту влияния вариаций ориентации луча антенны  $\Delta F_{DC}^{\alpha, \beta}$  и применению процедуры компенсации ошибок движения  $\Delta F_{DC}^{MoCo}$  (10).

На рис. 5 показан пример динамического доплеровского спектра, построенного по реальным радиолокационным данным. Данные были получены с помощью РСА-системы, разработанной в Радиоастрономическом институте НАН Украины [4–5].

Ширина луча реальной антенны в этом случае  $1^\circ$ , что соответствует полосе доплеровских частот  $BW_{Ant}$  около 100 Гц. На рис. 5 можно наблюдать значительные вариации доплеровского центра, значение расширенной полосы доплеровских частот составляет порядка 550 Гц. Таким образом, для компенсации рассмотренных эффектов необходимо увеличить ширину полосы доплеровских частот в несколько раз.

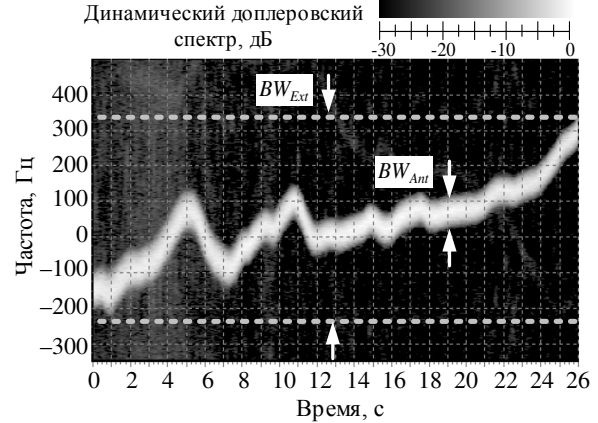


Рис. 5. Динамический доплеровский спектр после процедуры компенсации ошибок движения

В разд. 3 будет рассмотрен метод, позволяющий объединить полученное увеличенное число РСА-взглядов  $NL_{Ext}$  для формирования многовзглядного РСА-изображения без радиометрических ошибок.

**3. Радиометрическая коррекция РСА-взглядов.** Обозначим идеальное РСА-изображение местности как  $I_0(x, y)$ , где  $(x, y)$  – координаты пикселя изображения. Полученные РСА-взгляды обозначим  $I(l; x, y)$ , здесь  $l$  – номер РСА-взгляда. РСА-взгляды искажены спекл-шумом  $N(l; x, y)$  и радиометрическими ошибками  $0 < R(l; x, y) \leq 1$ . Учитывая мультипликативность спекл-шума, РСА-взгляд с индексом  $l$  можно записать в виде

$$I(l; x, y) = I_0(x, y)N(l; x, y)R(l; x, y). \quad (13)$$

Для оценки яркости изображения, искаженного радиометрическими ошибками, применим двумерный низкочастотный (НЧ) фильтр. Учитывая, что спекл-шум является высокочастотным, применение такого фильтра подавит большую часть шума, но сохранит при этом яркостные искажения на изображении, вызванные радиометрическими ошибками:

$$I_{LF}(l; x, y) \approx I_{0LF}(x, y)R_{LF}(l; x, y). \quad (14)$$

Здесь  $I_{0LF}(x, y)$  представляет собой НЧ-компоненту неискаженного РСА-изображения  $I_0(x, y)$ , а  $R_{LF}(l; x, y)$  – это сглаженная функция радиометрических ошибок. В данном рассмотрении предположим, что высокочастотная компонента радиометрических ошибок пренебрежимо мала, так что

$$R_{LF}(l; x, y) \approx R(l; x, y). \quad (15)$$

Для компенсации радиометрических ошибок, возникающих из-за нестабильностей

полета, мы предлагаем строить увеличенное число РСА-взглядов  $NL_{Ext}$ , которое соответствует расширенной полосе доплеровских частот. В отсутствие ошибок движения изображение местности будет на  $NL$  центральных РСА-взглядах. При наличии ошибок движения каждый участок местности будет виден на некотором количестве РСА-взглядов  $NL_{Comp} < NL$ . Стоит отметить, что индексы этих РСА-взглядов будут разными в зависимости от пикселя изображения  $(x, y)$ . Из всех построенных  $NL_{Ext}$  РСА-взглядов  $I(l; x, y)$  следует сформировать  $NL_{Comp}$  композитных РСА-взглядов  $I_{Comp}(l; x, y)$ , отбирая наиболее яркие значения для каждого пикселя путем сортировки соответствующих НЧ-компонент  $I_{LF}(l; x, y)$ .

Дальнейшая радиометрическая коррекция основана на том, что, по крайней мере, один РСА-взгляд из построенного увеличенного числа РСА-взглядов будет направлен очень близко к центру луча реальной антенны. Этот РСА-взгляд имеет максимальную яркость и не искажен радиометрическими ошибками. Для этого РСА-взгляда  $R(l; x, y) \approx 1$ , и мы можем его использовать в качестве опорного для оценки НЧ-компоненты РСА-изображения, неискаженной ошибками яркости:

$$I_{0LF}^{Est}(x, y) \approx \max_{1 \leq l \leq NL_{Ext}} \{I_{LF}(l; x, y)\}. \quad (16)$$

В результате величина радиометрической ошибки на РСА-взгляде с индексом  $l$  может быть восстановлена по формуле

$$R_{Est}(l; x, y) \approx \frac{I_{LF}(l; x, y)}{I_{0LF}^{Est}(x, y)}. \quad (17)$$

Тогда, применяя такую радиометрическую коррекцию ко всем композитным РСА-взглядам, мы можем построить многовзглядовое РСА-изображение без искажений:

$$I_{NL_{Comp}}(x, y) = \frac{1}{NL_{Comp}} \sum_{l=1}^{NL_{Comp}} I_{Comp}(l; x, y) \frac{I_{0LF}^{Est}(x, y)}{I_{Comp LF}(l; x, y)}. \quad (18)$$

Особенности алгоритма радиометрической коррекции и его практической реализации подробно рассмотрены в работе [11]. В разд. 4 приведены примеры применения ДДА с рассмотренными методами коррекции для построения реальных РСА-изображений.

**4. Экспериментальные результаты.** Для проверки предложенных методов радиометрической коррекции рассмотрим изображения, которые были получены РСА-системой, разработанной в Радиоастрономическом институте НАН Украины [4–5].

На рис. 6, а показано изображение, сформированное из 9 РСА-взглядов без применения радиометрической коррекции. Оно сильно искажено ошибками яркости. РСА-изображение, представленное на рис. 6, б, было получено путем усреднения увеличенного числа РСА-взглядов (83 РСА-взгляда), построенного на расширенной полосе доплеровских частот. Можно увидеть вариации яркости на этом изображении. Такие вариации являются результатом неравномерного освещения местности в процессе формирования синтезированной апертуры. Результат работы процедуры радиометрической коррекции показан на рис. 6, в. Полученное РСА-изображение состоит из 5 РСА-взглядов. Можно убедиться в том, что ошибки яркости были успешно устранены.

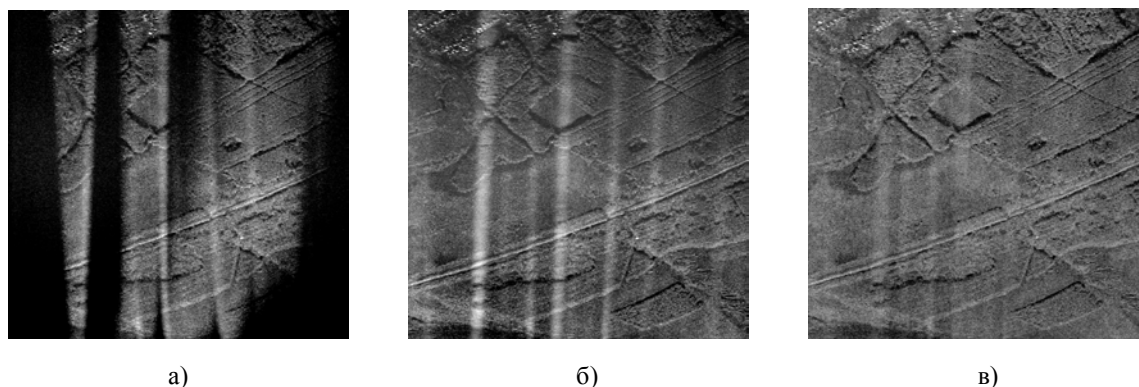


Рис. 6. Многовзглядовое РСА-изображения и радиометрическая коррекция

**Выводы.** Таким образом, рассмотрены особенности процедуры радиометрической коррекции при формировании РСА-изображений с помощью ДДА. Предложен подход, позволяющий

эффективно компенсировать вариации доплеровского центроида, возникающие в результате нестабильной ориентации луча реальной антенны и применения процедуры компенсации ошибок

движения. Показано, что разработанная процедура радиометрической коррекции может эффективно применяться для коррекции ошибок яркости на РСА-изображениях. Разработанные методы эффективно применяются в действующих РСА-системах.

#### Библиографический список

1. *Oliver C. J. Understanding Synthetic Aperture Radar Images / C. J. Oliver, S. Quegan. – Boston; L.: Artech House, 1998. – 480 p.*
2. *Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks / O. Frey, C. Mangard, M. Ruegg, E. Meier // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – 47, N 6. – P. 1844–1858.*
3. *Carrara W. G. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms / W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski. – Boston; L.: Artech House, 1995. – 555 p.*
4. *Cost-effective airborne SAR / D. M. Vavriv, V. V. Vynogradov, V. A. Volkov et al. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – 11, № 3. – С. 276–297.*
5. *Радиолокационные системы с синтезированной апертурой для легкомоторных самолетов / А. А. Безвесильный, Д. М. Ваврив, В. В. Виноградов и др. // Успехи современной радиоэлектрон. – 2012. – № 12. – С. 53–61.*
6. *Безвесильный А. А. Локально-квадратичная автофокусировка по смещению изображений для радиолокаторов с синтезированной апертурой / А. А. Безвесильный, Е. Н. Горовой, Д. М. Ваврив // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – 17, № 2. – С. 182–193.*
7. *Franceschetti G. Synthetic Aperture Radar Processing / G. Franceschetti, R. Lanari. – L.: CRC Press, 1999. – 328 p.*
8. *Moreira A. Improved multi-look techniques applied to SAR and SCANSAR imagery / A. Moreira // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 1991. – 29, N 4. – P. 529–534.*
9. *Cumming I. G. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation / I. G. Cumming, F. H. Wong. – Norwood, MA: Artech House, 2005. – 625 p.*
10. *Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms / R. Bamler // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – 30, N 4. – P. 706–713.*
11. *Multi-look radiometric correction of SAR images / O. O. Bezvesilnyi, I. M. Gorovyi, V. V. Vinogradov, D. M. Vavriv // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – 16, № 4. – С. 424–432.*

*Рукопись поступила 04.04.2013 г.*

I. M. Gorovyi, O. O. Bezvesilnyi, D. M. Vavriv

#### CORRECTION OF RADIOMETRIC DISTORTIONS IN IMAGES IN THE CASE OF SAR PROCESSING WITH RANGE-DOPPLER ALGORITHM

Synthetic aperture radar (SAR) is an effective instrument for the formation of high-resolution images of the earth surface. Trajectory instability is one of the factors that affect the quality of the obtained images. The problem is that even in the case of application of a common motion compensation procedure, which is necessary for synthetic aperture formation, instabilities of the antenna beam orientation are still left uncompensated. This leads to radiometric distortions in SAR images. This problem is especially critical in the case of SAR processing with frame-based

algorithms based on FFT (for example, the range-Doppler algorithm), which assume the constant antenna beam orientation within the large data blocks. In this paper the method of radiometric correction of SAR images is considered in the case of processing of SAR data in the frequency domain. Its idea is based on the formation of extended number of looks which corresponds to the broadening of the processed Doppler bandwidth. It is shown that such broadening allows to compensate the influence of two effects: changes of the real antenna beam orientation angles in respect to the aircraft velocity vector and also the possible additional broadening of the Doppler bandwidth of the received signals due to the application of the common motion compensation procedure. The obtained extended number of looks is used for the restoration of the multi-look SAR image without radiometric errors. The introduced methods of radiometric correction are an efficient alternative to expensive antenna stabilization systems and actively used in operating SAR systems. The efficiency of the developed algorithms is illustrated by real SAR data examples.

**Key words:** synthetic aperture radar, motion error compensation, multi-look processing, radiometric errors.

Є. М. Горовий, О. О. Безвесільний, Д. М. Ваврив

#### КОРЕКЦІЯ РАДІОМЕТРИЧНИХ ПОМИЛОК НА ЗОБРАЖЕННЯХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ДАЛЬНОСТНО-ДОПЛЕРІВСЬКОГО АЛГОРИТМУ В РАДІОЛОКАТОРАХ ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Радіолокатор із синтезованою апертурою (РСА) є ефективним інструментом для формування зображень земної поверхні з високим просторовим розрізненням. Одним із факторів, які впливають на якість отриманих зображень, є нестабільності польоту літака. Проблема полягає в тому, що незважаючи на застосування загальноприйнятої процедури компенсації відхилень траєкторії, яка необхідна для побудови синтезованої апертури, нестабільності орієнтації реальної антени залишаються некомпенсованими. Це призводить до радіометричних (яскравісних) помилок на зображеннях. Така проблема особливо актуальна у випадку застосування кадрових алгоритмів обробки даних, які базуються на використанні швидкого перетворення Фур'є (наприклад, дальностно-доплерівського алгоритму) і передбачають постійну орієнтацію променя антени в межах великих блоків даних. В роботі розглянуто метод корекції радіометричних помилок на радіолокаційних зображеннях при проведенні РСА-обробки в частотній області. Ідея методу базується на формуванні збільшеного числа РСА-поглядів, що відповідає розширенню полоси оброблених доплерівських частот. Показано, що розширення смуги частот дозволяє компенсувати вплив двох ефектів: зміни кутів орієнтації антени з часом відносно вектора швидкості літака, а також можливого додаткового розширення смуги доплерівських частот прийнятих сигналів у результаті застосування процедури компенсації помилок руху. Отримане збільшене число РСА-поглядів використовується для відтворення багатопоглядового РСА-зображення без радіометричних помилок. Запропоновані методи корекції радіометричних помилок є ефективною заміною дорогої системи стабілізації реальної антени і активно використовуються в діючих РСА-системах. Ефективність розроблених алгоритмів проілюстрована на прикладі реальних радіолокаційних даних.

**Ключові слова:** радіолокатор із синтезованою апертурою, компенсація помилок руху, багатопоглядова обробка, радіометричні помилки.