

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ ДЕТАЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ РСА ПО АЗИМУТУ

Бабокин Михаил Иванович

доктор технических наук, главный специалист АО «АЭРОКОН»¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

Митрофанов Вадим Витальевич

инженер второй категории АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»².

E-mail: mitrofanovvadim98@yandex.ru

¹Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 1.

²Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 3.

Аннотация: Целью данной работы является повышение детальности радиолокационных изображений за счёт использования интерферометрической обработки траекторного сигнала. Рассмотрены основы построения однопроходного мультитременного комплекса РСА с интерферометрической обработкой. Проведён анализ отклика РСА на точечный объект и введена модель отражённых парных импульсов. На основе сигнальной функции рассмотрено пространственное разрешение и проведён сравнительный анализ классического РСА и РСА той же функции с интерферометрической обработкой и разностной интерферометрической обработкой в зависимости от условий наблюдения и параметров мультитременного интерферометра. Получена количественная оценка повышения детальности радиолокационного изображения. Теоретически показано, что за счёт предложенных методов интерферометрической обработки сигналов можно улучшить разрешающую способность по азимутальной координате в 2...3 раза. Проведён анализ интерферометрических алгоритмов на экспериментальных данных с целью проверки теоретических характеристик. Приведённые результаты экспериментальной интерферометрической обработки подтвердили теоретические расчёты и показали, что временной сдвиг между парными импульсами не должен превышать время синтеза основного изображения.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), переднебоковой обзор, траекторный сигнал, интерферометрическая обработка, азимутальное разрешение, детальность РСА изображения.

Введение

Развитие теории и принципов построения РСА позволило создать высокоэффективные радиолокационные комплексы, способные получать радиолокационные изображения (РЛИ) с высокой пространственной разрешающей способностью и производить детальное зондирование поверхности Земли на большой дальности, независимо от погодных условий [1–5]. Вместе с тем, ряд технических ограничений, таких как время формирования, сектор обзора, проблемы навигации и т.п., не позволяют воспользоваться в полной мере достоинствами высокого пространственного разрешения.

Одним из вариантов решения отмеченной проблемы может быть совместная интерферометрическая обработка парных сигналов, по-

лученных на разных интервалах времени [6–12]. Подобная обработка позволит повысить детальность РЛИ по азимуту без значительного увеличения времени когерентного накопления.

Цель работы — рассмотреть основы построения мультитременного интерферометрического комплекса РСА обзора земной поверхности и провести анализ его пространственного разрешения по азимуту, обосновать условия применения интерферометрической обработки парных сигналов с последующей их экспериментальной проверкой.

Сигнальная функция РСА

Одной из характеристик, определяющих свойства РСА, является её реакция на сигнал от

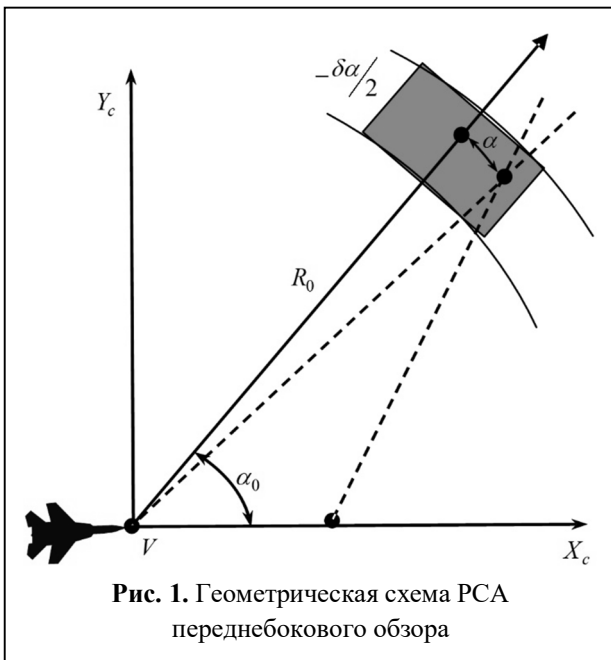


Рис. 1. Геометрическая схема РСА переднебокового обзора

точечного отражателя (ТО), или сигнальная функция [1–3]. На рис. 1 представлена геометрическая схема РСА в плане, где показано положение носителя в начальный момент времени, а затем положение того же носителя через некоторое время T_0 [7, 9].

Луч реальной диаграммы направленности антенны РСА отклонён вперёд на угол α_0 относительно линии пути носителя (при нормальном боковом обзоре $\alpha_0 = 90^\circ$) [7, 9].

РСА начинает когерентное импульсное (без внутри импульсной модуляции) облучение участка земной поверхности в момент времени $t = 0$ при азимутальном угле наблюдения α_0 и угле падения θ_0 . Наблюдение за выбранным участком земной поверхности осуществляется определённое время $t = 0 \dots (T_c + T_0)$, которое определяется условиями обзора и разрешающей способностью (T_c — время синтезированной апертуры антенны; T_0 — время между парными сеансами наблюдения). Базовый параметр интерферометра [7, 9]: $B_0 = VT_0$.

Для удобства описания в рассмотрение введена система координат, ось $o_c x_c$ которой в начальный момент направлена вдоль линии

пути носителя, проходящего через фазовый центр антенны (ФЦА), а оси $o_c y_c, o_c z_c$ образуют с ней правую ортогональную систему координат.

Учитывая возможность пространственного разрешения импульсно-доплеровских РСА [1–3], облучаемую поверхность удобно разбить на элементы разрешения размером $\delta y = \delta r \sin \theta_0 \cos \alpha_0$ и $\delta x = \delta \alpha R_0 \sin \theta_0 \sin \alpha_0$, δr — разрешение по наклонной дальности, $\delta \alpha = \lambda / 2V \sin \theta_0 \sin \alpha_0 T_c$ — угловое разрешение по азимуту.

Детальному анализу подвергается один элемент разрешения в центре картографируемого участка земной поверхности. Предположим также, что в центре этого элемента разрешения установлен ТО, размеры которого значительно меньше элемента разрешения.

На интервале когерентного накопления дальность от ФЦА до любой точки внутри элемента разрешения с азимутальной координатой $\alpha = -\frac{\delta \alpha}{2} \dots \frac{\delta \alpha}{2}$, определяющей угловое отклонение от центра элемента разрешения (без смещения по дальности относительно центра элемента разрешения) определим следующим образом:

$$R(\alpha, t) = \sqrt{R_0^2 - 2VtR_0 \sin \theta_0 \cos(\alpha_0 + \alpha)}. \quad (1)$$

Формирование синтезированных лучей в прожекторном или телескопическом режиме [1–3] заключается в когерентном накоплении принятых сигналов после фазовой коррекции с применением выражения (1):

$$\varphi(\alpha, t) = \left(4\pi/\lambda\right) R(\alpha, t).$$

Для спектрального анализа определяющим является направление азимута α . При $\alpha = 0$ создаётся условие полного согласования с фазой отражённого сигнала ТО, находящегося в центре элемента разрешения. При настройке РСА на отклонённый от центра азимут $\alpha \neq 0$, происходит рассогласование в соответствии с (1) и амплитуда отклика РСА будет падать. При определённом рассогласовании $\alpha = \delta \alpha$, отклик РСА упадёт до нуля.

Отметим, что вместо непрерывного представления азимута α обычно используют дискретное с определённым шагом [1, 2]. При обработке траекторного сигнала в прожекторном режиме гармоническим анализом обычно выбирают шаг дискретизации равным элементу разрешения или его половине. В случае интерферометрической обработки сигнала и формирования детальной сигнальной функции шаг дискретизации выбираем из условия: $\partial\alpha = \frac{\delta\alpha}{M}$,

$$M = 8 \dots 16.$$

Важно знать, как изменяется фазовая структура сигнала РСА от сеанса к сеансу наблюдения. На том же рис. 1 показана другая начальная позиция второго сеанса наблюдения того же носителя РСА. Дальность до точки с азимутальной координатой α определим следующим образом:

$$R(\alpha, t + T_0) = R(\alpha, t) - B_0 \sin \theta_0 \cos(\alpha_0) - B_0 \alpha \sin \theta_0 \sin \alpha_0. \quad (2)$$

Выделим разность между (1) и (2):

$$\begin{aligned} \Delta R(\alpha, t) &= R(\alpha, t) - R(\alpha, t + T_0) \approx \\ &\approx B_0 \sin \theta_0 \cos(\alpha_0) + B_0 \alpha \sin \theta_0 \sin \alpha_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим ряд особенностей выражения (3):

- первая составляющая определяет разность дальностей в двух сеансах наблюдения относительно центра элемента разрешения, которая известна и просто компенсируется;
- вторая составляющая зависит не только от B_0 и α , но и от α_0 ;
- влияние времени на разность (3) можно считать незначительным.

Будем также считать, что дополнительных амплитудных и фазовых искажений между сеансами наблюдения не привносится [7], земная поверхность ровная и неподвижная, а навигационные данные обеспечивают высокую точность измерения [1, 2, 3].

Модели отражённых парных сигналов запишем следующим образом:

$$s_0(t) = A_c \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R(0, t) \right\},$$

$$s_1(\alpha, t) = A_c \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} R(0, t + T_0) \right\},$$

где A_c — комплексная амплитуда переотражения точечного отражателя.

В этом случае сигнальная функция (азимутальная, без учёта влияния шумов приёмника) в первом и втором сеансе наблюдения будет иметь следующий вид [1–3]:

$$\begin{aligned} c_0(\alpha_0 + \alpha) &= \int_{t=-T_c/2}^{T_c/2} s_0(t) h(\alpha, t) dt, \\ c_1(\alpha_0 + \alpha) &\approx c_0(\alpha_0 + \alpha) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \times \right. \\ &\times [B_0 \sin \theta_0 \cos \alpha_0 + B_0 \alpha \sin \theta_0 \sin \alpha_0] \left. \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $h(\alpha, t)$ — комплексная опорная функция РСА, согласованная с анализируемым азимутальным углом α .

В результате РСА обработки (без дополнительной весовой обработки) получаем модуль сигнальной функции:

$$\begin{aligned} A(\alpha_0 + \alpha, R_0) &= \sqrt{c_0(\alpha_0 + \alpha, R_0) * c_0^*(\alpha_0 + \alpha, R_0)} \approx \\ &\approx [A_c] T_c \frac{\sin \left(\pi \left(\frac{\alpha}{\delta\alpha} \right) \right)}{\left(\pi \left(\frac{\alpha}{\delta\alpha} \right) \right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Интерферометрическая обработка

Интерферометрическая обработка предполагает использование операции комплексного сопряжения парных сигналов [6–10]. В нашем случае парные сигналы формируются за счёт пространственного смещения носителя во времени. После компенсации среднего набега фазы между сеансами наблюдения, производится операция комплексное сопряжение этих парных сигналов:

$$\begin{aligned} B(\alpha_0 + \alpha) &= c_0(\alpha_0 + \alpha) c_1^*(\alpha_0 + \alpha) \approx \\ &\approx \left(T_c A_c \frac{\sin \left(\pi \left(\frac{\alpha}{\delta\alpha} \right) \right)}{\left(\pi \left(\frac{\alpha}{\delta\alpha} \right) \right)} \right)^2 \times \end{aligned}$$

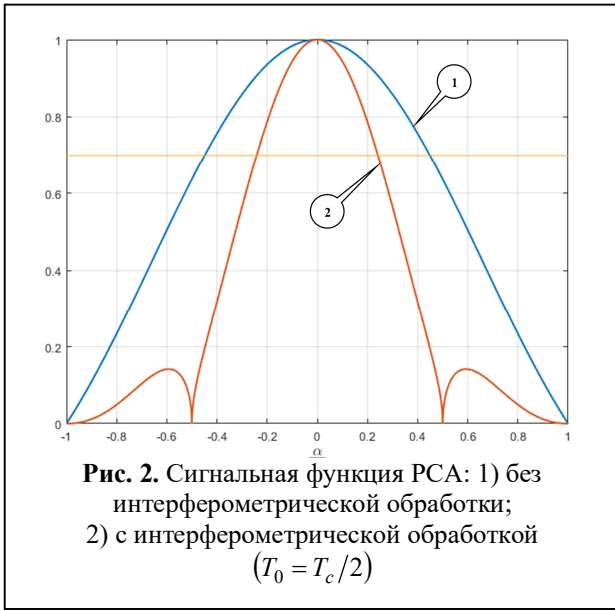


Рис. 2. Сигнальная функция PCA: 1) без интерферометрической обработки; 2) с интерферометрической обработкой ($T_0 = T_c/2$)

$$\times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}[B_0\alpha \sin \theta_0 \sin \alpha_0]\right). \quad (6)$$

Отметим, что при $\alpha = 0$, когда полностью компенсируется фазовая траектория сигнала ТО, реальная часть сигнальной функция максимальна, а мнимая — минимальна.

Выделим из выражения (6) реальную часть:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(B(\alpha_0 + \alpha)) &= \left[T_c A_c \frac{\sin\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)}{\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)} \right]^2 \times \\ &\times \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}[T_0 V \alpha \sin \theta_0 \sin \alpha_0]\right). \quad (7) \end{aligned}$$

Для получения сигнальной функции интерферометрической PCA воспользуемся операцией извлечения квадратного корня и при условии постоянства азимутального разрешения в секторе: $T_0 \approx T_c/2 = \lambda/4V \sin \theta_0 \sin \alpha_0 \delta\alpha$, получим:

$$R(\alpha_0 + \alpha) \approx [A_c] T_c \frac{\sin\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)}{\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)} \sqrt{\left|\cos\left(\pi\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right|}. \quad (8)$$

Первый множитель выражения (8) равен такому множителю (5), который становится равным нулю при $\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right) = 1$, а второй интерфе-

рометрический множитель обнуляется при $\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right) = \frac{1}{2}$. Именно второй множитель и даёт

повышение детальности изображения. Время между сеансами наблюдения может быть разным и при меньшем времени — степень повышения детальности будет уменьшаться, а при увеличении — увеличиваться.

На рис. 2 представлены нормированные зависимости сигнальной функции PCA в зависимости от угла α , рассчитанные в соответствии с (5) и (8).

Видим, что за счёт дополнительной интерферометрической обработки, сигнальная функция обузилась в 2 раза, а суммарное время когерентного накопления увеличилось в 1,5 раза.

Анализ сигнальной функции показывает, что мнимая часть комплексного сопряжения (6) равна нулю при $\alpha = 0$, а по мере увеличения α начинает возрастать. Воспользуемся этим для дальнейшего повышения детальности РЛИ и введём в дополнение к интерферометрической разностную обработку:

$$\begin{aligned} I(\alpha_0 + \alpha) &= \left(\left| \operatorname{Re}\left(c_0(\alpha_0 + \alpha)c_1^*(\alpha_0 + \alpha)\right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \gamma \operatorname{Im}\left(c_0(\alpha_0 + \alpha)c_1^*(\alpha_0 + \alpha)\right) \right| \right)^{\frac{1}{2}} \approx \\ &\approx [A_c] T_c \frac{\sin\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)}{\left(\pi\left(\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right)\right)} \sqrt{\left| \cos\left(\pi\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right) - \gamma \left| \sin\left(\pi\frac{\alpha}{\delta\alpha}\right) \right| \right|}, \quad (9) \end{aligned}$$

где $\gamma \approx 0,5$ — согласующий коэффициент.

На рис. 3 представлены нормированные зависимости от угла α сигнальной функции PCA и разностной интерферометрической, полученной в соответствии с выражением (9). Здесь наблюдается дальнейшее улучшение (примерно на 25%) разрешающей способности. Сравнение кривых под цифрами 1 и 2 показывает, что общее повышение азимутального разрешения за счёт разностной интерферометрической обработки составило 2,5 раза.

Однако при возрастании азимутального разрешения за счёт увеличения базового параметра мультитременного интерферометра наблюдается повышение уровня боковых лепестков. Борьба с интерферометрическими боковыми лепестками может стать предметом отдельных исследований. Кратко можно отметить, что с такими боковыми лепестками можно бороться путём организации парных сигналов с различными базовыми параметрами.

Экспериментальная отработка

Для проверки работоспособности алгоритмов интерферометрической обработки с целью повышения детальности РСА изображений использовались реальные комплексные цифровые сигналы, записанные на борту авиационного носителя когерентно-импульсной РСА. Зондирование типовой земной поверхности с объектами транспортной структуры и хранилищами производилось сложными фазомодулированными импульсами с разрешающей способностью по наклонной дальности $\delta r \approx 10$ м, размер зоны обзора по дальности (горизонтальное направление) $\Delta R \approx 5$ км.

За счёт использования техники синтеза апертуры антенны на дальности $R_0 \approx 40$ км было получено РЛИ с линейной разрешающей способностью по азимуту $\delta l = R_0 \delta \alpha \approx 16$ м. При этом размер зоны по азимуту $\Delta l = 8$ км (вертикальное направление). В процессе обработки была также произведена операция интерполяции, так что на элемент разрешения по азимуту приходится 16 выборок выходной матрицы РЛИ. Азимутальный угол наблюдения $\alpha_0 = 35^\circ$.

На рис. 4, а представлено исходное РЛИ размером 8192x512. Невысокое азимутальное разрешение особенно заметно на изображениях искусственных объектов.

Можно видеть, что на рис. 4, б азимутальное разрешение повысилось в 2...3

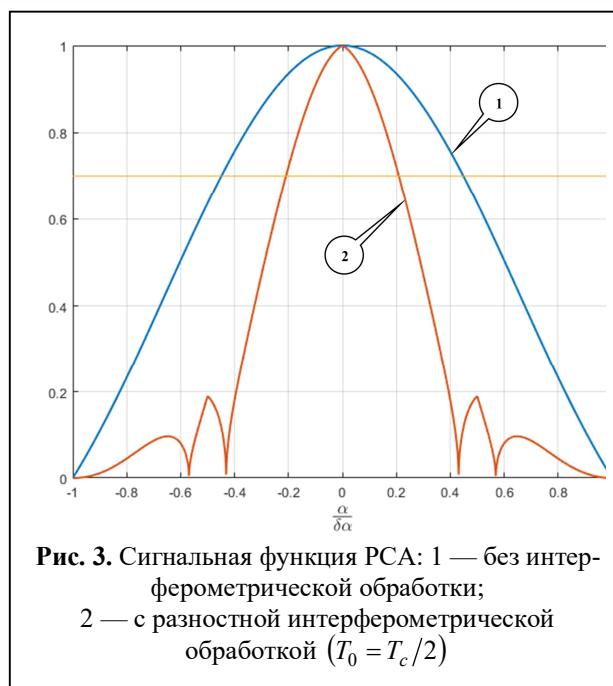


Рис. 3. Сигнальная функция РСА: 1 — без интерферометрической обработки; 2 — с разностной интерферометрической обработкой ($T_0 = T_c/2$)

раза за счёт разностной интерферометрической обработки при $T_0 = T_c/2$.

На рис. 4, в представлено РЛИ после обработки с $T_0 = T_c$. В этом случае азимутальное разрешение повышается до 3...5 м. При этом декорреляция парных сигналов в области боковых лепестков достигает граничных значений.

Четвёртый фрагмент на рис. 4, г представлен для демонстрации интерферометрического предела при $T_0 = 2T_c$, когда внутри главного лепестка сигнальной функции (5) появляется несколько интерферометрических откликов. Подобные искажения РЛИ недопустимо искажают радиолокационное изображение.

Заключение

Рассмотрены основы построения однопроводного мультитременного комплекса РСА с интерферометрической обработкой с целью повышения детальности изображения по азимутальной координате:

- проведён анализ пространственного разрешения и сравнительный анализ сигнальной функции классического РСА, той же функции с интерферометрической обработкой и разностной интерферометрической

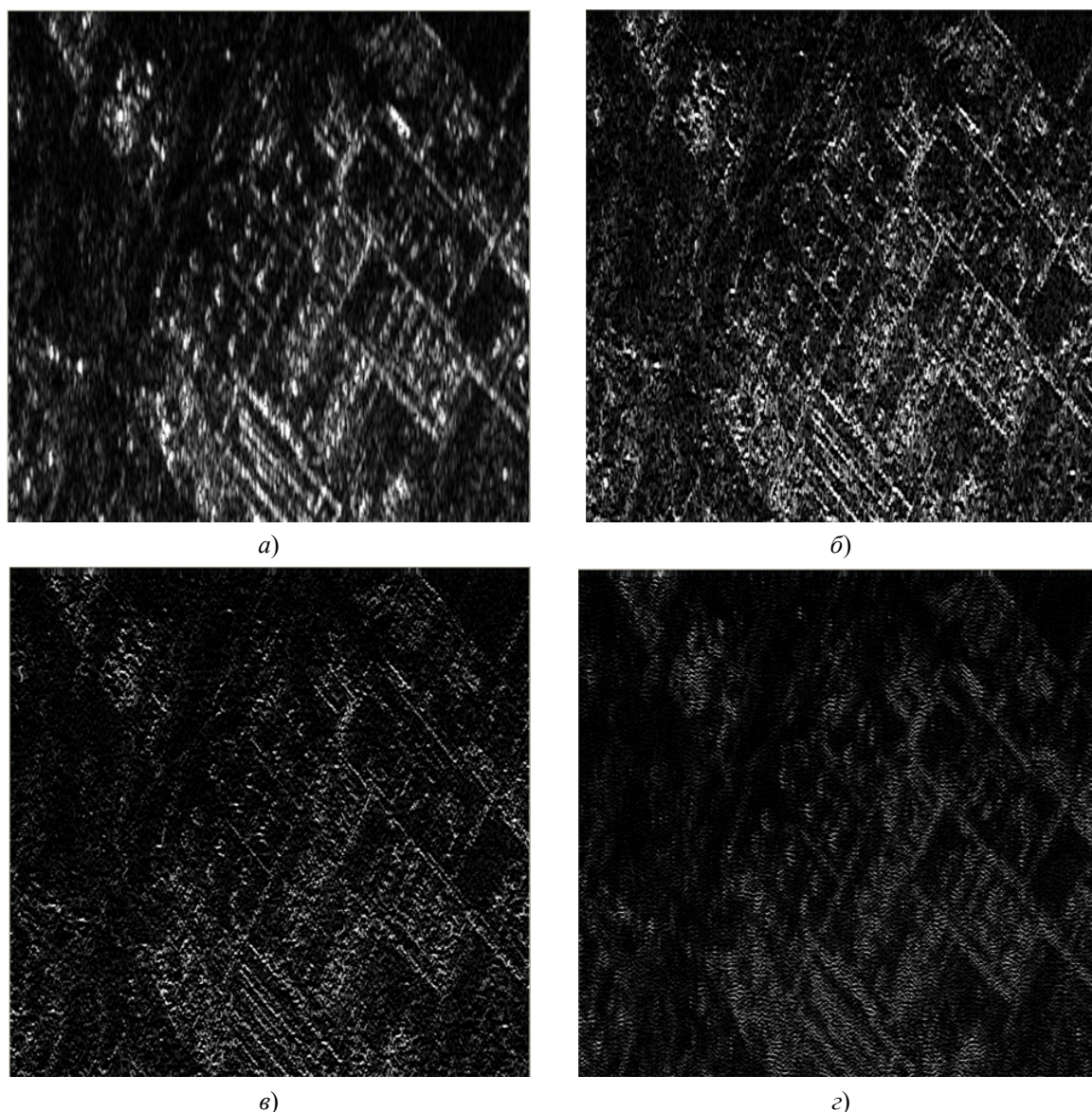


Рис. 4. РЛИ: а) одного интервала синтезирования; б) с интерферометрической обработкой, $T_0 = T_c/2$; в) с интерферометрической обработкой, $T_0 = T_c$; г) с интерферометрической обработкой, $T_0 = 2T_c$.

обработкой в зависимости от условий наблюдения и параметров мультивременного интерферометра,

- получена количественная оценка повышения детальности изображения,
- проведён анализ интерферометрических алгоритмов на экспериментальных данных с целью проверки теоретических характеристик.

Литература

1. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешиф-

рирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского. Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.

2. Цифровая обработка сигналов в РСА. Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.

3. Бабочкин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Космический аппарат «Кондор-Э» и его возможности // Исследование Земли из космоса. 2017. №3. С. 85–95. DOI: 10.7868/S0205961417030010.

4. Антипов В.И., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Толстов Е.Ф. и др. Радиолокационные станции с

цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В. Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

5. Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

6. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

7. Турук В.Э., Верба В.С., Толстов Е.Ф. и др. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 69–83. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.

8. Fornaro G., Pascazio V. SAR Interferometry and Tomography: Theory and Applications // Academ-

ic Press Library in Signal Processing. 2014. Vol. 2. Pp. 1043–1117. DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.

9. 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. Vol. 11. No. 1070. Pp. 1–21. DOI: 10.3390/rs11091070.

10. 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.

11. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 716–807.

12. Richards M.A. Fundamentals of radar signal processing. New York: McGrawHill, 2022. 513 p.

Поступила 17 октября 2024 г.

English

INTERFEROMETRIC ENHANCEMENT OF THE DETAIL OF THE SAR IMAGE IN AZIMUTH

Mikhail Ivanovich Babokin — Grand Dr. in Engineering, Chief Specialist, JSC “AEROCON”¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

Vadim Vitalievich Mitrofanov — Engineer of the 2nd category, JSC “RIIE named after V.V. Tikhomirov”².

E-mail: mitrofanovvadim98@yandex.ru

¹Address: 140180, Russian Federation, Moscow region, Zhukovsky, Gagarin str., 1.

²Address: 140180, Russian Federation, Moscow region, Zhukovsky, Gagarin str., 3.

Abstract: One of the problems of synthetic aperture radar (SAR) is to increase the spatial resolution. The resolution of the SAR in azimuthal coordinate is improved by switching to a multi-pass or searchlight shooting mode, in which the desired effect is achieved by increasing the synthesis time. In addition, the implementation of such shooting modes involves scanning the antenna beam in the azimuthal plane, which complicates the process of obtaining radar images. To overcome these disadvantages and increase the detail of radar images, it is proposed to use differential interferometric processing of the trajectory signal and radio holograms obtained with a time shift. The aim of the work is to increase the detail of radar images by using interferometric processing of the trajectory signal. The fundamentals of the construction of a single-pass multitemporal SAR complex with interferometric processing are considered. The SAR response to a point object is analyzed and a model of reflected paired pulses is introduced. Based on the signal function, the spatial resolution is considered and a comparative analysis of the classical SAR and SAR of the same function with interferometric processing and difference interferometric processing is carried out, depending on the observation conditions and parameters of a multi-time interferometer. A quantitative assessment of the increased detail of the radar image has been obtained. Theoretically, it is shown that due to the proposed methods of interferometric signal processing, the azimuthal coordinate resolution can be improved by 2...3 times. The analysis of interferometric algorithms based on experimental data is carried out in order to verify the theoretical characteristics. The results of experimental interferometric processing confirmed the theoretical calculations and showed that the time shift between paired pulses should not exceed the synthesis time of the main image.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), front-side survey, trajectory signal, interferometric processing, azimuthal resolution, detail of the SAR image.

References

1. *Shkolny L.A., Tolstov E.F. et al.* Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
2. SAR digital signal processing. Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. 232 p.
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 and its capabilities. Exploration of the Earth from space. 2017. No. 3. Pp. 85–95. DOI: 10.7868/S0205961417030010.
4. *Antipov V.I., Goryainov V.T., Kulin A.N., Tolstov E.F. et al.* Digital synthetic aperture radars. Ed. by *V.T. Goryainov*. Moscow: Radio i svyaz, 1988. 304 p.
5. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Ed. by *V.S. Verba*. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
6. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radiovision. Earth remote sensing radar systems. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
7. *Turuk V.E., Verba V.S., Golovanova M.V., Golubtsov P.E., Evsikov M.V., Neronskiy L.B., Zaitsev S.E., Tolstov E.F.* Strizh SAR for small Condor-E satellites. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. Vol. 14. No. 5. Pp. 69–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
8. *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.
9. *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. Vol. 11. No. 1070. Pp. 1–21. DOI: 10.3390/rs11091070.
10. *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.
11. *Ouchi K.* Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics. Remote Sensing. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 716–807.
12. *Richards M.A.* Fundamentals of radar signal processing. New York: McGrawHill, 2022. 513 p.