

УДК 621.396

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЗИОБЪЕМНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов

Центральный научно-исследовательский институт ВВКО Минобороны России,
141091, Москва

Статья поступила в редакцию 4 октября 2019 г.

Аннотация. Предложен способ получения двумерного инверсно-синтезируемого радиолокационного изображения с определением третьей координаты элементов разрешения формируемого изображения. Результат достигается за счет приёма отражённого сигнала на две разнесённые по высоте антенны и вычисления третьей координаты (относительной высоты) элементов формируемых изображений на основе известных значений углов места наблюдения объекта обеими приёмными антеннами и полученных набегов фаз элементов двух сформированных двумерных РЛИ. Получаемые предлагаемым способом квазиобъемные инверсно-синтезированные РЛИ позволяют упростить и ускорить решения задач дефектоскопии объектов, а также их идентификации и селекции.

Ключевые слова: инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения, объемные изображения.

Abstract. The inverse synthetic aperture radar systems are widely applied in many fields, like space and air control systems, special research laboratories and outdoor measurements facilities. Inverse synthetic aperture radar can form two-dimensional electromagnetic images of targets, which are used for target classifications and recognition. However, two-dimensional images do not provide the height information about scattering centers. In this paper we proposed a method for obtaining a volumetric inverse synthetic aperture radar images, characterized by the ability to determine the relative height of scattering centers on image. The result is achieved by receiving the reflected signal from the two antennas with closely-separated elevation angles and determining the relative height based on the known values of object

observation angles and phase values of each image elements. Interferometric processing, in contrast to the classical three dimensional inverse synthetic aperture radar algorithm, is more feasible in real conditions. Simulation results are obtained in order to verify the effectiveness of the proposed method. We can recommend this processing to various practical cases in air control, measurement facilities or laboratories efforts. Volumetric inverse-synthesized radar images of objects, obtained by the proposed method, make it possible to simplify and accelerate the solution of the problem of defectoscopy of objects, as well as problems of identification and selection due to recognition of objects by their digital images (three-dimensional models) without the need to create a database of specialized standards.

Key words: inverse synthetic aperture, radar images, radar cross section, volumetric images, radar interferometry.

Широкополосные радиолокационные системы с режимами формирования двумерных радиолокационных изображений (РЛИ) объектов методом инверсного синтезирования апертуры [1,2] могут применяться при решении задач контроля воздушного и космического пространства [3] и дефектоскопии исследуемых объектов на радиолокационных измерительных полигонах [4].

Существенным ограничением использования двумерных РЛИ на практике является неизвестная третья координата (относительная высота) их элементов разрешения, что не позволяет устанавливать однозначное соответствие выявляемых на изображениях РЦ элементам конструкции объекта.

Для решения указанной задачи предлагается способ получения двумерного радиолокационного изображения объекта при многочастотном импульсном зондировании и инверсном синтезе апертуры с определением третьей координаты элементов формируемого изображения.

Отличием способа от известных является то, что отражённый сигнал одновременно принимают две разнесённые по высоте антенны, первая из которых наблюдает объект под углом места γ_0 , а вторая под углом места γ_A ;

соответственно формируют два двумерных РЛИ с элементами (k,l) , где $k=1,\dots,K$, $l=1,\dots,L$, K,L – увеличенные за счёт добавления нулевых сигнальных отсчётов количественные размеры каждого РЛИ; оценивают третью координату элементов полученных изображений по соотношению

$$y_{kl} \approx \frac{c}{4\pi f_0 \cos \gamma_0} \left(\frac{\varphi^A(k,l) - \varphi^0(k,l)}{\gamma_A - \gamma_0} \right), \quad (1)$$

где $\varphi^A(k,l)$ и $\varphi^0(k,l)$ – значения набегов фаз в элементах РЛИ,

$$f_0 = \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2} \text{ – средняя частота полосы перестройки.}$$

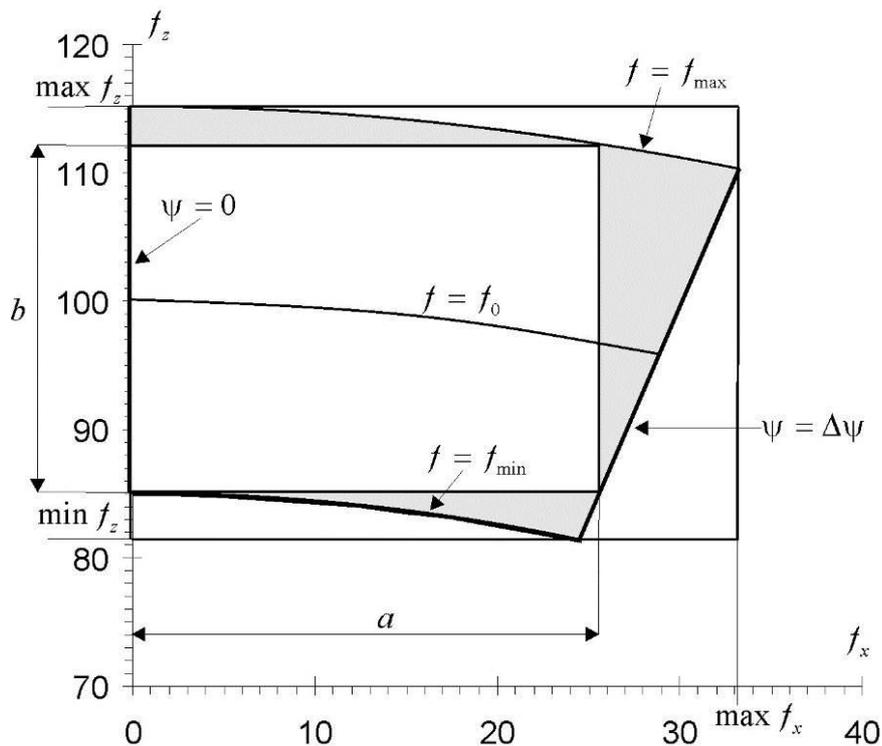


Рис. 1. Области определения сигнала.

Известно [2], что оператор синтезирования РЛИ после свертки взятых в координатах пространственных частот комплексных огибающих с фокусирующей опорной функцией, с учетом условий дальней зоны локации и физической области определения сигнала в виде кругового сектора на плоскости пространственных координат (рис.1), представляется в виде

$$s(x, z) = \frac{1}{\Delta f_z \Delta f_x} \int_{\min f_z}^{\max f_z} \int_{\min f_x}^{\max f_x} S(f_x, f_z) e^{j2\pi(f_z z + f_x x)} df_x df_z. \quad (2)$$

где
$$S(f_x, f_z) = \begin{cases} S(f, \psi), & \text{если } [f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \wedge |\psi| \leq \Delta\psi] \\ 0, & \text{если } [f < f_{\min} \vee f > f_{\max} \vee |\psi| > \Delta\psi] \end{cases}$$

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{f_z^2 + f_x^2}, \quad \psi = \arctg \frac{f_x}{f_z}, \quad \Delta f_z = \max f_z - \min f_z, \quad \Delta f_x = \max f_x - \min f_x.$$

Дискретная форма оператора (2) с учетом интерполяции сигнала из полярных в прямоугольные координаты имеет вид

$$s(n, m) = \frac{1}{N_1} \frac{1}{M_1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{m_1=0}^{M_1-1} S(n_1, m_1) e^{j2\pi \left(\frac{n_1 n + m_1 m}{N_1 M_1} \right)},$$

где
$$S(n_1, m_1) = \begin{cases} S(f_{n_1 m_1}, \psi_{n_1 m_1}), & \text{если } [f_{\min} \leq f_{n_1 m_1} \leq f_{\max} \wedge |\psi_{n_1 m_1}| \leq \Delta\psi] \\ 0, & \text{если } [f_{n_1 m_1} < f_{\min} \vee f_{n_1 m_1} > f_{\max} \vee |\psi_{n_1 m_1}| > \Delta\psi] \end{cases},$$

$$f_{n_1 m_1} = \frac{c}{2} \sqrt{f_{z_{n_1}}^2 + f_{x_{m_1}}^2}, \quad \psi_{n_1 m_1} = \arctg \frac{f_{x_{m_1}}}{f_{z_{n_1}}},$$

$$f_{z_{n_1+1}} = f_{z_{n_1}} + \frac{1}{L_z}, \quad f_{z_1} = \min f_z, \quad N_1 = L_z \Delta f_z,$$

$$f_{x_{m_1+1}} = f_{x_{m_1}} + \frac{1}{L_x}, \quad f_{x_1} = \min f_x, \quad M_1 = L_x \Delta f_x,$$

L_z, L_x - задаваемые размеры координатной области.

Размеры области определения пространственных частот (рис.1):

$$\min f_z = \begin{cases} \frac{2f_{\min}}{c} \cos \Delta\psi, & \text{если } \Delta\psi \leq \pi/2 \\ \frac{2f_{\max}}{c} \cos \Delta\psi, & \text{если } \Delta\psi > \pi/2 \end{cases}, \quad \max f_z = \frac{2f_{\max}}{c},$$

$$\min f_x = \begin{cases} -\frac{2f_{\max}}{c} \sin \Delta\psi, & \text{если } \Delta\psi \leq \pi/2 \\ \frac{2f_{\max}}{c}, & \text{если } \Delta\psi > \pi/2 \end{cases}, \quad \max f_x = \begin{cases} \frac{2f_{\max}}{c} \sin \Delta\psi, & \text{если } \Delta\psi \leq \pi/2 \\ \frac{2f_{\max}}{c}, & \text{если } \Delta\psi > \pi/2 \end{cases}.$$

Потенциально лучшее значение разрешения двумерного РЛИ по поперечной координате (по «азимуту») получим при синтезировании сигнала в секторе углов размером в половину круга и более. Приближенная оценка этого

разрешения равна $\frac{1}{\Delta f_x} = \frac{1}{\Delta f_z} = \frac{\lambda_{\min}}{4}$, где $\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}}$. Точная оценка разрешения

слабым образом зависит от ширины полосы частот: при перестройке частоты от 0 до 200% изменяется от $0,2 \lambda_0$ до $0,18 \lambda_0$, где $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ [Там же. С.213].

Разрешение двумерных РЛИ по дальности при интегрировании по полукругу в два раза хуже указанного разрешения поперек и приближается к нему при увеличении размера сектора углов синтезирования до полного круга. При синтезировании в полном круге получаем так называемые круговые двумерные РЛИ, разрешение которых в любом направлении одинаково и составляет $(0,2 \dots 0,18) \lambda_0$.

Рассматривая одновременный прием отраженного сигнала на две антенны O и A и сворачивая принятые сигналы S^O и S^A в полосе частот ΔF и секторе углов азимута $\pm \Delta \psi$, имеем два РЛИ s^O и s^A :

$$s^{O,A}(f, \psi) = \frac{1}{\Delta F 2\Delta \psi} \int_{-\Delta F/2}^{\Delta F/2} \int_{-\Delta \psi}^{\Delta \psi} S^{O,A}(f, \psi) e^{-j \frac{4\pi f}{c} (z \cos \psi \cos \gamma + x \sin \psi \cos \gamma + y \sin \psi \sin \gamma)} df d\psi \quad (3)$$

где γ – угол места между фазовым центром соответствующей приемной антенны и центром вращения наблюдаемого объекта.

Принимая, в силу малости высот антенн сравнительно с дальностью до наблюдаемого объекта, $\cos \gamma \approx 1$ и полагая $e^{-j \frac{4\pi f}{c} (y \sin \gamma)} \approx e^{-j \frac{4\pi f_0}{c} (y \sin \gamma)}$, переписываем (3) в координатах пространственных частот

$$s^{O,A}(x, z) = \frac{1}{\Delta f_z \Delta f_x} \int_{\min f_z}^{\max f_z} \int_{\min f_x}^{\max f_x} S^{O,A}(f_x, f_z) e^{-j \frac{4\pi f_0}{c} y \sin \gamma} e^{j 2\pi (f_z z + f_x x)} df_x df_z.$$

Тогда разница набегов фаз элементов двух изображений $\varphi^A(x, z)$ и $\varphi^O(x, z)$ может быть оценена из соотношения:

$$\varphi^A(x, z) - \varphi^O(x, z) \approx \frac{4\pi f_0}{c} y (\sin \gamma_A - \sin \gamma_O).$$

Представляя $\gamma_A = \gamma_O + (\gamma_A - \gamma_O)$ и учитывая малость $(\gamma_A - \gamma_O)$, имеем

$$\frac{4\pi f_0}{c} y (\sin(\gamma_O + (\gamma_A - \gamma_O)) - \sin \gamma_O) \approx \frac{4\pi f_0}{c} y (\gamma_A - \gamma_O) \cos \gamma_O.$$

Тем самым относительная высота элемента (x, z) полученных изображений равна

$$y \approx \frac{c}{4\pi f_0 \cos \gamma_0} \left(\frac{\varphi^A(x, z) - \varphi^0(x, z)}{\gamma_A - \gamma_0} \right).$$

Имея относительную высоту всех элементов двумерных РЛИ, каждое из них можно представить в виде квазиобъемного изображения, позволяющего устанавливать однозначное соответствие выявляемых РЦ элементам конструкции объекта.

Работоспособность предлагаемого способа проверена методом математического моделирования.

Условия локации заданы следующим образом:

зондирующие сигналы РЛС – импульсы с периодом повторения 20 мкс, несущая частота сигнала меняется от импульса к импульсу с шагом 1000/511 МГц в полосе частот от 9500 до 10500 МГц;

объект равномерно вращается со скоростью 12°/с.

Модель объекта задана в виде совокупности неподвижных относительно связанной системы отсчета 9 РЦ, которые расположены в линию на расстоянии 15 см друг от друга с монотонным изменением высоты в соответствии с таблицей 1. Уровни ЭПР заданных РЦ выбраны одинаковыми и равными в относительных единицах 50 дБ.

Таблица 1

Номер РЦ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Относительная высота, м	-0,8	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,25	0,75	1,0	1,5

На рис.2 приведено двумерное РЛИ объекта в плоскости локации, полученное согласно прототипу в соответствующем заданной перестройке частоты секторе углов наблюдения $\pm 3^0$. Разрешение РЛИ составляет 15см. Погрешность оценки двух координат заданных РЦ составляет 5%. Третья координата РЦ не определена.

На рис.3 приведены двумерные РЛИ объекта в плоскости локации (наблюдение под углами места $\gamma_0 = 0^\circ$ и $\gamma_A = 1^\circ$), полученные предложенным способом для того же сектора углов наблюдения $\pm 3^\circ$. На рис.4 два полученных РЛИ представлены в пространстве. Разрешение РЛИ составляет 15см. Погрешность оценки двух координат заданных РЦ составляет 5%, третьей координаты – 10%.

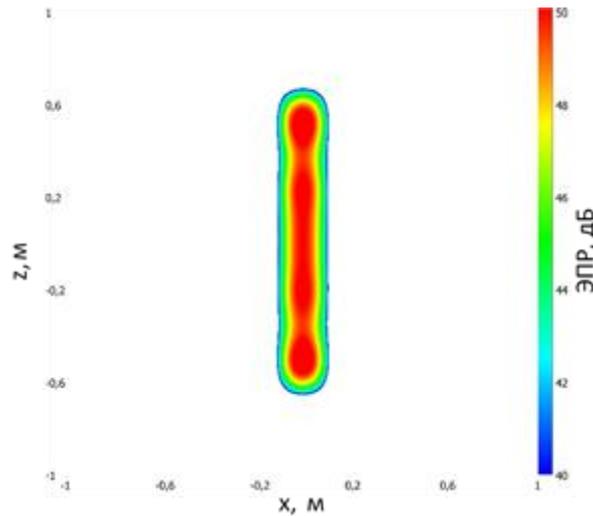


Рис. 2. РЛИ объекта в секторе углов наблюдения $\pm 3^\circ$ по прототипу.

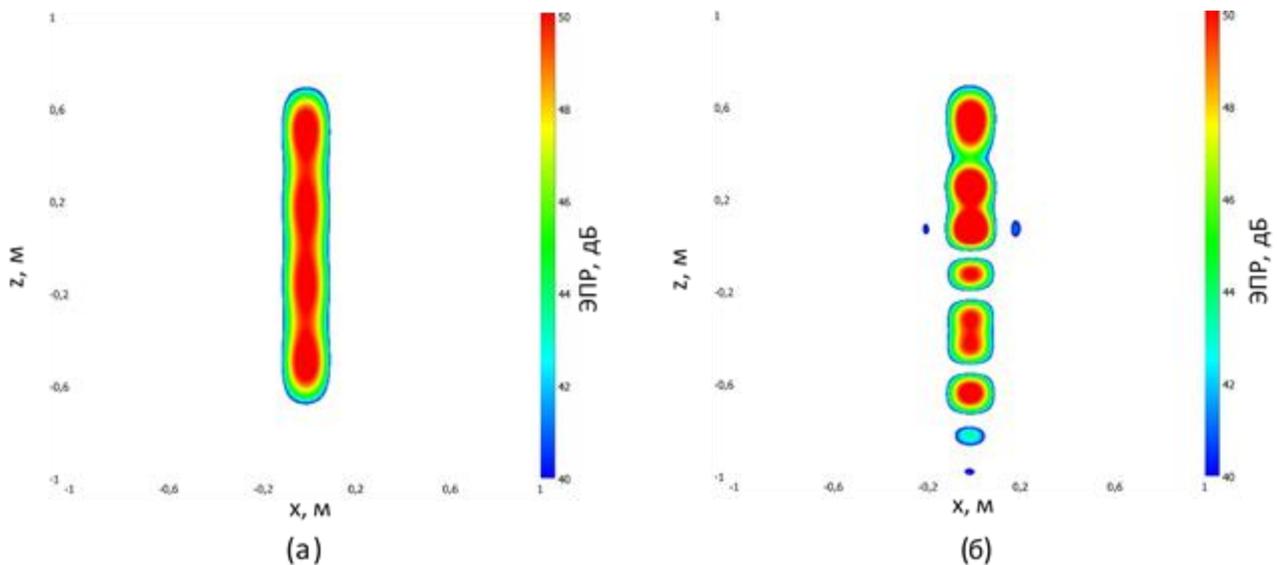


Рис. 3. РЛИ объекта в секторе углов наблюдения $\pm 3^\circ$ по предложенному способу под углами места 0° (а) и 1° (б)

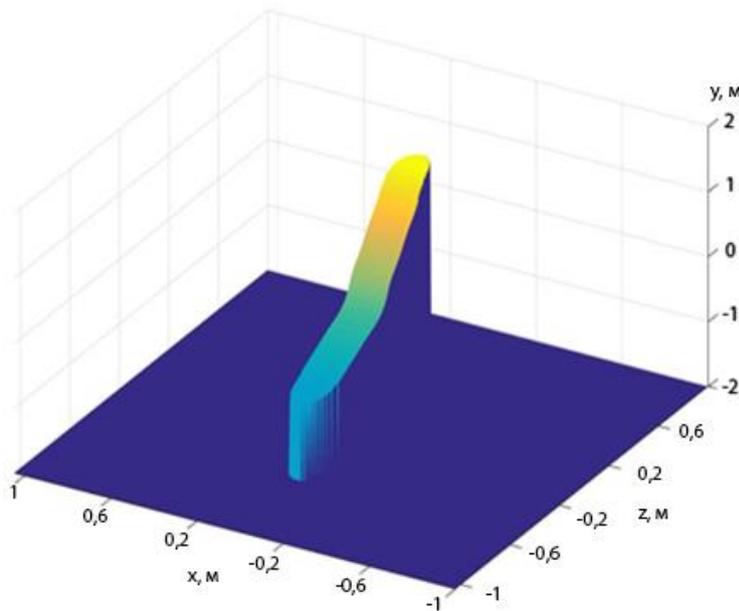


Рис. 4. Квазиобъемное РЛИ объекта в секторе углов наблюдения $\pm 3^\circ$.

Полученные предлагаемым способом квазиобъемные инверсно-синтезированные РЛИ объектов позволяют упростить и ускорить решение задачи дефектоскопии объектов [5], а также задач идентификации и селекции за счёт распознавания объектов по их цифровым образам (трехмерным моделям) без необходимости формирования базы данных специализированных эталонов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

Литература

1. Steinberg V.D. Microwave imaging of aircraft. Proceedings of IEEE, 1988, Vol. 76, No. 12, pp. 1578-1592.
2. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова – М.: Радиотехника, 2015.
3. Chen V.C., Martorell M. Inverse synthetic aperture radar imaging. Principles, Algorithms and Applications. SciTech publishing, Edison, NJ, 2014.
4. Грибков А.С., Грибков В.С., Моряков С.И., Слухаева Д.А. Способ экспериментального определения вкладов отражений от элементов

конструкции объектов по их радиолокационным изображениям // Труды XXXI Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» // Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019, выпуск 13.

5. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скоков П.Н., Скородумов И.А. Экспериментальные результаты формирования трехмерных радиолокационных изображений объектов интерферометрическим методом // Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» // Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017, выпуск 12.

Для цитирования:

С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов. Способ получения квазиобъемного радиолокационного изображения объекта. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.2