

УДК 621.396.96

Восстановление трёхмерного рельефа местности в авиационном интерферометрическом пространственно-частотном радиолокаторе

Б. Н. Федотов¹, С. А. Станкевич^{2*}, Е. В. Цветков¹¹ *Національний університет оборони України ім. І. Черняховського, Київ, Україна*² *ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, Киев, Украина*

В статье рассмотрен метод формирования трёхмерного радиолокационного изображения рельефа местности в авиационном двухантенном интерферометрическом пространственно-частотном радиолокаторе. Основной особенностью метода выступает параллельное получение двумерных пространственно-частотных спектров радиолокационного отражения и его производной для последующего синтезирования. Предложена структура построения такого интерферометрического радиолокатора, приведены соотношения для расчёта его основных характеристик. Рассмотрен алгоритм восстановления рельефа земной поверхности относительно референсной горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: интерферометрический радиолокатор, двумерный пространственно-частотный спектр, рельеф местности, частотно-ограниченная плоскость, зондирующий сигнал, структурная схема

© Б. Н. Федотов, С. А. Станкевич, Е. В. Цветков. 2017

Введение

Радиолокационная съёмка земной поверхности позволяет более эффективно решать множество природоресурсных, научных и специальных задач. Современные радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) обеспечивают получение детальной информации об объектах местности [10]. Интерферометрический режим радиолокационной съёмки также позволяет прецизионно оценивать превышения точек местности.

В обычном режиме съёмки РСА изображение полосы (кадра) зондирования формируется в координатах “задержка — пространственная частота”. Затем в предположении, что земная поверхность плоская, координаты пересчитываются в систему “дальность — путевая дальность”. Рельеф местности искажает масштаб радиолокационного изображения (РЛИ) пропорционально превышениям элементов поверхности.

Интерферометрический режим РСА обеспечивает формирование трёхмерного РЛИ местности в координатах “дальность — путевая дальность — высота” для каждого разрешаемого элемента. Информация о функции отражения по наклонной и путевой дальности получается классическим для РСА способом. Для получения информации о высоте рельефа местности используется дополнительный канал измерения угла места каждого элемента разрешения [8].

Постановка задачи

В авиационных РСА используется антенная система, состоящая из двух разнесённых по углу места антенн. Сдвиг фаз сигналов интерферометра и несёт информацию о высоте рельефа [9]. В дифференциальном интерферометрическом режиме РСА фиксируются изменения высоты от одного разрешаемого элемента к другому, а на изображении местности в координатах “наклонная дальность — путевая дальность” выводятся линии равных углов места.

Повышение точности измерения высоты в имеющихся авиационных интерферометрических РСА достигается путями [2]:

- увеличением базы интерферометра;
- повышением отношения “сигнал — шум” в канале измерения фазы интерферометрического сигнала (несколько обзоров при некогерентном накоплении сигналов РСА);
- использованием пространственно-временного фильтра слежения за фазой сигнала.

Точность измерения высоты рельефа определяется точностью измерения высоты полёта носителя РСА H , наклонной дальности до элемента разрешения R , углов наклона осей диаграмм направленности антенн интерферометрической РСА γ и угла места элемента разрешения зондируемой поверхности [6]. Математическое ожидание ошибок измерения высоты увеличивается при увеличении площади элемента разрешения. Улучшение разрешающей способности РСА классической структуры до долей метра приводит к существенному ограниче-

* E-mail: st@casre.kiev.ua

нию дальности действия [5], для преодоления которого необходимо использовать новые подходы, например, как в [3].

Целью данной статьи является рассмотрение одного из возможных конкурентных технических решений построения авиационного интерферометрического радиолокатора с синтезированием двумерного спектра.

Метод

Структура рассматриваемого радиолокатора может быть сформирована на основе теории воспроизведения трёхмерного РЛИ сцены по методу пространственных частот [4]. Аналитическое описание формирования трёхмерного РЛИ сцены имеет вид:

$$y(x_2, x_3) = \frac{\beta_D(x_2, x_3)}{\alpha_D(x_2, x_3)}, \tag{1}$$

$$\chi(x_2, x_3) = P|\alpha_D(x_2, x_3)|, \tag{2}$$

где

$$\alpha(x_2, x_3) = \frac{1}{2\sqrt{p^3}} \operatorname{Re} \int_{p_0 - \Delta p_2 - \Delta p_3}^{p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3} \int_{p_0 - \Delta p_2 - \Delta p_3}^{p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3} \frac{\rho(0, p_2, p_3)}{|\sqrt{p_2^2 + p_3^2}|} e^{i(p_2 x_2 + p_3 x_3)} dp_2 dp_3 = \frac{1}{p} \chi(x_2, x_3) \cdot e^{ipx_2}, \tag{3}$$

$$\beta(x_2, x_3) = \frac{1}{2\sqrt{p^3}} \operatorname{Im} \int_{p_0 - \Delta p_2 - \Delta p_3}^{p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3} \int_{p_0 - \Delta p_2 - \Delta p_3}^{p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3} \frac{\partial}{\partial p_1} \left[\frac{\rho(\bar{p})}{|\sqrt{p_2^2 + p_3^2}|} \right]_{p_1=0} e^{i(p_2 x_2 + p_3 x_3)} dp_2 dp_3 = e^{ip_0 x_2} \cdot \chi \cdot x_1(x_2, x_3) = e^{ip_0 x_2} \cdot \chi(x_2, x_3) \cdot y_1(x_2, x_3), \tag{4}$$

$\chi(x_2, x_3)$ — проекция функции отражения поверхности сцены и объектов на ней на плоскость (x^2, x^3) — плоскость визирования сцены зондирования, $y(x_2, x_3)$ — рельеф местности относительно плоскости визирования, p_0 — пространственная частота зондирования по координате p_2 .

Вектор \bar{p} частотного пространства по направлению совпадает с единичным вектором, который направлен от начала координат внутри отражающей поверхности сцены (цели) к точке расположения приёмопередатчика РСА, совпадает с центром трёхмерной пространственной системы координат и количественно равен

$$p = |\bar{p}| = \frac{2\omega}{c}, \tag{5}$$

где ω — угловая частота гармонического сигнала зондирования, c — скорость света.

Функция $\rho(\bar{p})$ соответствует принятому и измеренному отражённому гармоническому сигналу зондирования в общем случае в точках сферы радиуса R вокруг сцены (участка) радиолокационной

съемки. Центры частотной и пространственной систем координат и их оси p_1, p_2, p_3 и x_1, x_2, x_3 соответственно совпадают.

Измерение отражённых сигналов $\rho(\bar{p})$ проводится на прямоугольной частотно-ограниченной плоскости (ЧОП) D (рис. 1) частотного пространства при движении носителя по дуговой траектории в горизонтальной плоскости относительно центра сцены зондирования (рис. 2).

Разрешающие способности по координатам наклонной δ_2 и путевой δ_3 дальностей соответственно равны

$$\delta_2(x_2) = \frac{P}{\Delta p_2}, \quad \delta_3(x_3) = \frac{P}{\Delta p_3}, \tag{6}$$

где $2\Delta p_2, 2\Delta p_3$ — диапазоны пространственных частот по соответствующим координатам трёхмерного частотного пространства, определяющие стороны прямоугольной ЧОП D .

Объём сцены зондирования ограничен как произведением ширины диаграммы направленности (ДН) антенны на дальность до сцены в азимутальной и угломестной плоскости, так и длительностью принимаемого отражённого зондирующего сигнала. Поэтому измерения можно осуществлять в дискретных точках прямоугольной ЧОП и двумерное преобразование Фурье от непрерывных функций

$\frac{\rho(0, p_2, p_3)}{|\sqrt{p_2^2 + p_3^2}|}$ и $\frac{\partial}{\partial p_1} \left[\frac{\rho(\bar{p})}{|\sqrt{p_2^2 + p_3^2}|} \right]_{p_1=0}$ заменить двумерным дискретным преобразованием Фурье (ДДФ).

В этом случае временной интервал дискретизации Δt по координате путевой дальности равен периоду следования зондирующего сигнала T

$$\Delta t = T \leq \frac{d}{2V}, \tag{7}$$

где d — горизонтальный размер приёмо-передающей антенны, V — путевая скорость носителя.

Зондирующим сигналом являются радиоимпульсы со ступенчатой линейной частотной модуляцией (рис. 3).

Длительность зондирующих импульсов с постоянной несущей, дискретно перестраиваемой от импульса к импульсу, равна

$$\tau \geq \frac{2\Delta R}{c}, \tag{8}$$

где ΔR — размер сцены по координате наклонной дальности.

Число импульсов с постоянной несущей

$$n \geq \frac{\Delta R}{\delta_2}, \tag{9}$$

и период следования зондирующего сигнала

$$T \geq 2nt. \tag{10}$$

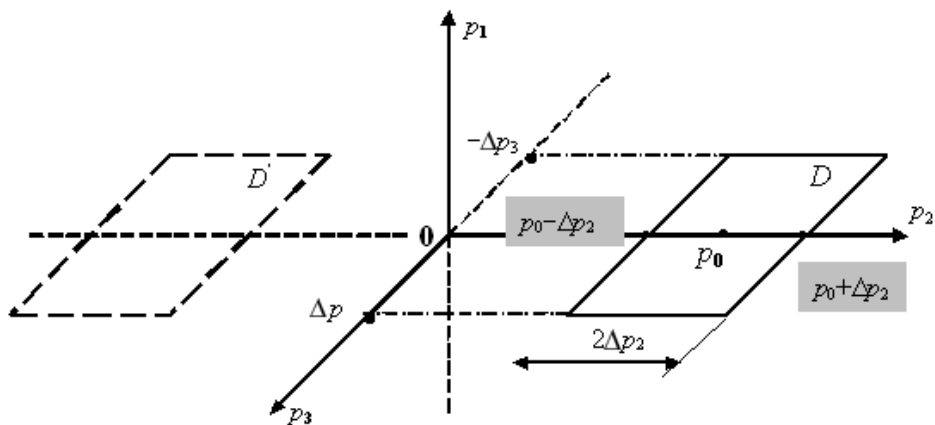


Рис. 1. Частотно-ограниченная плоскость интерференционной съёмки

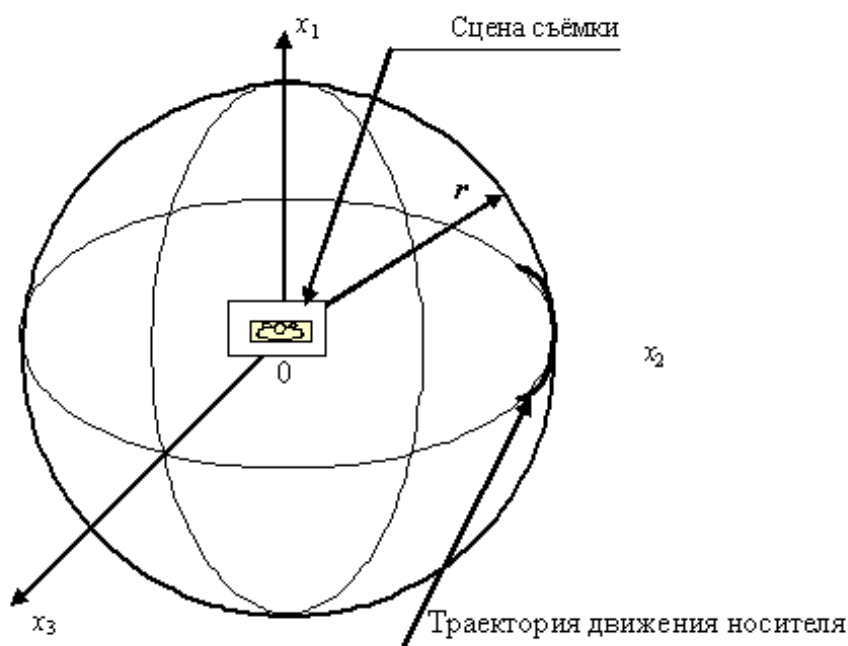


Рис. 2. Пространственная траектория зондирования — дуга в горизонтальной плоскости

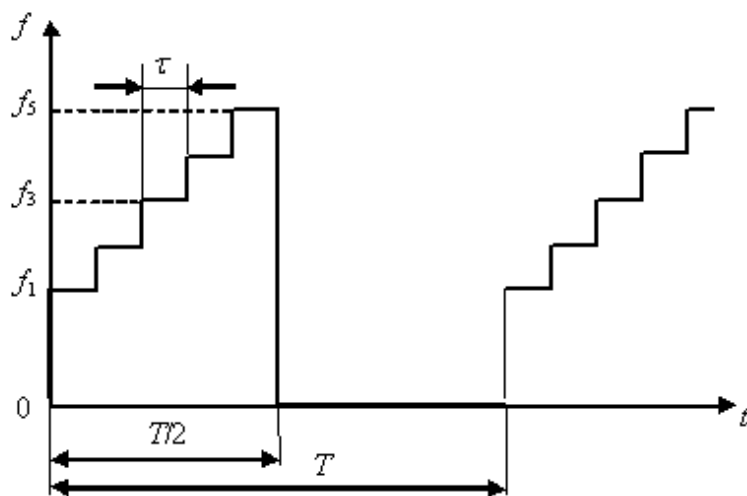


Рис. 3. Структура зондирующего сигнала

С учётом (7)–(9) выражение (10) преобразуется к виду

$$\frac{d}{2V} \geq 2 \frac{\Delta R}{\partial_2} \cdot \frac{2\Delta R}{c} \quad (11)$$

При равном разрешении по наклонной и путевой дальностями $\delta_2 = \delta_3 = d/2$ максимальный размер кадра наблюдения по наклонной дальности ΔR можно определить из соотношения

$$\Delta R \leq \frac{d}{4} \sqrt{\frac{c}{V}} \quad (12)$$

Например, для $\Delta R = 1$ км при установке интерферометрического радиолокатора с синтезированием двумерного пространственного спектра на низкоскоростной ДПЛА при скорости $V = 50$ м/с, структурное ограничение на обеспечиваемое разрешение составляет

$$\delta_2 = \delta_3 \geq 2\Delta R \sqrt{\frac{c}{V}} = 2 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{50}{3 \cdot 10^8}} = 0.82 \text{ м} \quad (13)$$

Для получения рельефа местности относительно плоскости визирования необходимо измерять функцию отражения $\rho(\vec{p})$ и её частные производные $\frac{\partial \rho(\vec{p})}{\partial p_1}$ по координате p_1 в дискретных точках ЧОП трёхмерного частотного пространства на траектории синтеза двумерного пространственного спектра сцены зондирования.

В авиационных интерферометрических РСА оценка производной функции отражения сцены зондирования производится по измерениям отношений приращению отражённого сигнала по углу места к соответствующему изменению проекции пространственной частоты на координату p_1 , т. е.

$$\frac{\partial \rho(\vec{p})}{\partial p_1} \approx \frac{\rho(0, p_2, p_3) - \rho(a, p_2, p_3)}{a} \quad (14)$$

Схематически это означает, что в точках формирования дискретных значений пространственного спектра кадра РЛИ — точках траектории съёмки необходимо использовать две антенны. Эти антенны разнесены по углу места на определённое расстояние b . В процессе съёмки измеряются и записываются отражённые сигналы обеих приёмо-передающих антенн в точках частотного пространства прямоугольной ЧОП ($p_1=0, p_2, p_3$) и ($p_1=a, p_2, p_3$).

Сигналы этих двух антенных систем оптимальным образом принимаются когерентными приёмниками с идентичными характеристиками, оцифровываются, и пересчитываются по формуле (14) в оценку производной отражённых сигналов по координате p_1 в каждой точке ЧОП. При этом ∂p_1 аппроксимируется величиной

$$a = \frac{p_2 b}{R} \quad (15)$$

Интервал дискретизации измерений пространственной частоты p_2 равен

$$\delta p_2 = \frac{2\Delta p_2}{n} = \frac{2P}{\Delta R} \quad (16)$$

тогда шаг дискретизации частоты излучаемого сигнала

$$\delta f_2 = \frac{c}{2\Delta R} \quad (17)$$

и диапазон частот излучаемого зондирующего сигнала

$$\mathcal{F}_2 = \frac{c}{2\Delta R} \quad (18)$$

Интервал дискретизации по координате p_3 соответствует расстоянию $d/2$ на траектории синтеза двумерного спектра сцены съёмки. Этот линейный интервал дискретизации соответствует частотному интервалу дискретизации по координате p_2 при $\delta_2 = \delta_3$.

При выборе размеров сцены по наклонной и путевой дальностям одинаковыми минимальное число периодов зондирующего сигнала m равно

$$m = \frac{2\Delta R}{d} \quad (19)$$

Для уменьшения времени обработки ДПФ обычно заменяется на быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Полученный относительно плоскости визирования рельеф $y_1(x_2, x_3)$ сцены съёмки пересчитывается в трёхмерную систему декартовых координат. Её начало отсчёта определяется пересечением оси ДН антенны с горизонтальной плоскостью, расположенной на расстоянии H под носителем. Ось горизонтальной дальности x совпадает с проекцией оси ДН антенны на горизонтальную плоскость.

Техническое решение

Вывод практических соотношений для пересчёта рельефа сцены относительно плоскости визирования в рельеф сцены относительно плоской горизонтальной поверхности, расположенной на расстоянии H ниже носителя поясняется рис. 4.

Для произвольной точки A сцены в трёхмерной системе координат с центром внутри зондируемого участка местности проекция на плоскость визирования соответствует точке B , а её координаты равны $A(y_1(x_2, x_3) = |AB|, x_2 = |OB|, x_3)$.

Пересчёт в декартову систему координат с осями x, y, z , где плоскость x, y горизонтальна, выполняется по стандартным формулам [6]:

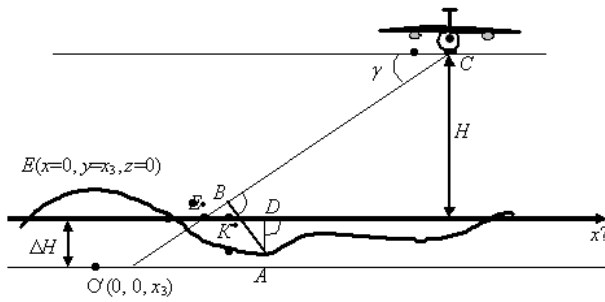


Рис. 4. Восстановление рельефа местности в точке съёмки

$$z_A = |AD| = [y_{1A}(x_2, x_3) - (x_{2A} - \frac{\Delta H}{\sin \gamma}) \operatorname{tg} \gamma] \cos \gamma, \quad (20)$$

$$y_A = x_{3A}, \quad (21)$$

$$x_A = \frac{x_{2A} - \frac{\Delta H}{\sin \gamma}}{\cos \gamma} + \left[y_{1A}(x_2, x_3) - \left(x_{2A} - \frac{\Delta H}{\sin \gamma} \right) \operatorname{tg} \gamma \right] \sin \gamma; \quad (22)$$

здесь γ — угол визирования, ΔH — расстояние от центра сцены до горизонтальной плоскости на поверхности Земли; $y_{1A}(x_2, x_3) = x_{1A}, x_{2A}, x_{3A}$ — координаты точки A в выбранной пространственной системе координат.

Структурная схема интерферометрического радиолокатора, реализующего описанный принцип синтеза двумерного пространственного спектра, приведена на рис. 5.

Интерферометрический радиолокатор функционирует под управлением бортового процессора 1. После выхода на траекторию съёмки в процессе обработки принимаемых сигналов выполняется имитация движения носителя по виртуальной дуговой траектории. Блок управления и привод 4 антенной системы 3 обеспечивают необходимую пространственную ориентацию и стабилизацию ДН по сигналам акселерометров 5. В паре приёмопередатчиков 6 формируются зондирующие сигналы и осуществляется их когерентный приём после

отражения от снимаемой поверхности. Аналогово-цифровые преобразователи переводят принятые сигналы в цифровую форму. В компенсаторе отклонений 9 выполняется фазовая коррекция принятых сигналов по расчётам вычислителя фазовой коррекции 8 и тем самым имитируется движение носителя по виртуальной траектории съёмки. Предварительная фильтрация в блоках 10, 11 и 12 предназначена для определения средних значений принятых дискретных комплексных сигналов на каждой несущей частоте зондирующих импульсов на максимально возможном интервале дискретизации (16). Процессор формирования изображений 14 восстанавливает дискретные действительные значения радиолокационного отражения сцены, которые записываются в память изображений 15. Устройство отображения 16 формирует визуальное изображение сцены с учётом информации о превышениях элементов разрешения.

Выводы

Рассмотренный подход к построению авиационного интерферометрического радиолокатора с синтезированием двумерного пространственного спектра отличается от известных тем, что для улучшения точности измерения высот рельефа участка местности практически не требуется увеличение вертикального размера антенной системы. Кроме того, технически достижимые энергетические показатели таких систем при разрешении порядка дециметров могут быть несколько лучшими, чем у применяемых в настоящее время интерферометрических РСА классической архитектуры.

В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть конкретную возможную конструкцию антенной системы интерферометрического радиолокатора с синтезированием двумерного пространственного спектра, а также определить рациональные диапазоны рабочих скоростей, высот и дальностей действия при использовании интерферометрического режима для решения некоторых специфических задач радиолокационной

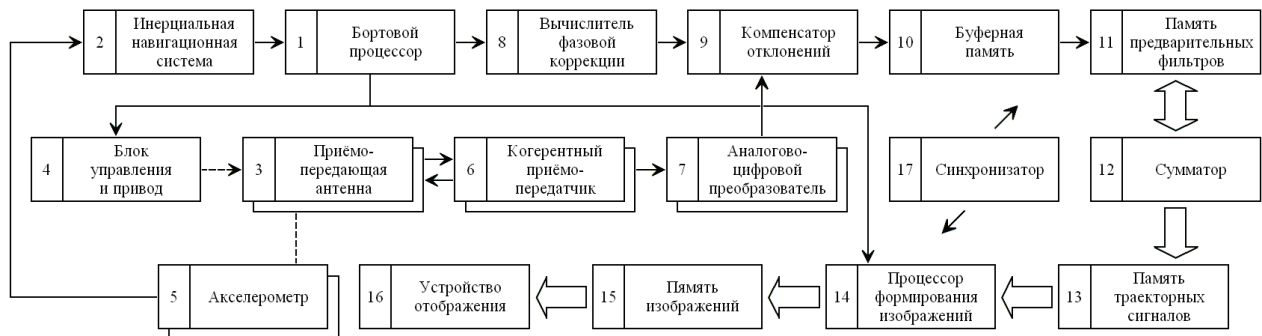


Рис. 5. Структурная схема интерферометрического радиолокатора с синтезированием двумерного спектра пространственных частот

съёмки, таких как мониторинг предвестников и последствий природных и техногенных катастроф [1], выбор и контроль качества временных посадочных площадок.

Отдельной задачей выступает верификация описанного метода, хотя бы теоретическая: для этого требуется рассчитать величины ошибок измерения высоты рельефа в различных возможных условиях интреферометрической радиолокационной съёмки при различных допустимых значениях характеристик РСА и параметров полёта.

Литература

1. Комплексирование методов анализа амплитуды и фазы спутниковых радарных снимков для оценки смещений оползневых склонов / Киселёва Е. А [и др.]. // Вестник Московского Университета. Физика. Астрономия. — 2015. — № 4. — С. 87–94.
2. Кондратенков Г. С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов. — М.: Радиотехника, 2005. — 368 с.
3. Федотов Б. М. Спосіб синтезування апертури РЛС бокового огляду і пристрій для його здійснення / Б. М. Федотов, С. А. Станкевич, С. О. Пономаренко / Патент України на винахід № 92116. — 2010. — Бюл. № 18.
4. Федотов Б. Н. Воспроизведение трёхмерного радиолокационного изображения сцены по методу пространственных частот / Б. Н. Федотов // Радиотехника. — 2014. — № 177. — С. 20–27.
5. Федотов Б. Н. Методика построения рабочих областей параметров “разрешающая способность — дальность действия” радаров с синтезированной апертурой / Б. Н. Федотов, С. А. Станкевич // Радиотехнические и компьютерные системы. — 2014. — № 1(65). — С. 7–12.
6. Geometrical SAR image registration / Sansosti E. E. [et al.]. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2006. — Vol.44. — No. 10. — P. 2861–2870.
7. Phase offset calculation for airborne InSAR DEM generation without corner reflectors / Perna S. [et al.]. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2015. — Vol. 53. — No. 5. — P. 2713–2726.
8. Simons M. Interferometric synthetic aperture radar geodesy / M. Simons, P. A. Rosen // Treatise on Geophysics / G. Schubert (editor-in-chief). — Oxford: Elsevier, 2015. — P. 339–385.
9. Towards airborne single pass decimeter resolution SAR interferometry over urban areas / Schmitt M. [et al.]. // Photogrammetric Image Analysis. — Berlin: Springer-Verlag, 2011. — P. 197–208.
10. Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: Signal processing and applications / Reigber A. [et al.]. // Proceedings of the IEEE. — 2013. — Vol. 101. — No. 3. — P. 759–783.

ВІДНОВЛЕННЯ ТРИВІМІРНОГО РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ В АВІАЦІЙНОМУ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОМУ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОМУ РАДІОЛОКАТОРІ

Б. М. Федотов, С. А. Станкевич, Є. В. Цветков

В статті розглянуто метод формування тривимірного радіолокаційного зображення рельєфу місцевості в авіаційному двохантному інтерферометричному просторово-частотному радіолокаторі. Основною особливістю метода виступає паралельне одержання двовимірних просторово-частотних спектрів радіолокаційного відбиття та його похідної для подальшого синтезування. Запропоновано структуру побудови такого інтерферометричного радіолокатора, наведено співвідношення для розрахунку його основних характеристик. Розглянуто алгоритм відновлення рельєфу земної поверхні відносно референсної горизонтальної площини.

Ключові слова: інтерферометричний радіолокатор, двовимірний просторово-частотний спектр, рельєф місцевості, частотно-обмежена площина, зондувальний сигнал, структурна схема

THREE-DIMENSIONAL TERRAIN ELEVATION RESTORATION IN AIRBORNE INTERFEROMETRIC FREQUENCY-DOMAIN RADAR

B. N. Fedotov, S. A. Stankevich, E. V. Tsvetkov

This paper is devoted to the method for a three-dimensional radar image restoration of terrain elevations using airborne two-antenna interferometric frequency-domain radar. A method's main feature is the parallel obtaining of two-dimensional frequency-domain spectra both of radar terrain echo and its derivative for next synthesizing. The architecture of such interferometric radar is proposed, and math equations for one's performance calculation are presented. The numerical algorithm for the terrain elevations calculation over an arbitrary horizontal plane is developed.

Keywords: interferometric radar, two-dimensional frequency-domain spectrum, terrain elevations, frequency-bounded plane, probing signal, block diagram