

УДК 621. 396

ФЕДОТОВ Б.М., старший науковий співробітник, доктор технічних наук, доцент
КОВТУН В.І., інженер відділу

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ РЕЛЬЄФУ В ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ РАДАРАХ СИНТЕЗУВАННЯ ДВОВИМІРНОГО ПРОСТОРОВОГО СПЕКТРУ

В статті оцінено похибку вимірювання висоти рельєфу інтерферометричного радіолокатора з синтезуванням двовимірного просторового спектру. Показано, що точність вимірювання висоти рельєфу визначається точністю вимірювання різниці фаз прийнятого двома каналами відбитого сигналу, частотою зондувального сигналу та дальністю до сцени зондування

Ключові слова: інтерферометричний радіолокатор із синтезованою апертурою, двовимірний просторовий спектр, діаграма спрямованості, похибка вимірювання висоти рельєфу, відбивна здатність

Вступ. Стан проблеми

Відомо, що інтерферометричний режим радіолокаційного знімання дозволяє прецензійно оцінювати висоту розрізнявальних елементів місцевості. У відомих інтерферометричних радіолокаційних станціях із синтезуванням апертури (РСА) забезпечується формування три вимірного радіолокаційного зображення (РЛЗ) місцевості в координатах «дальність-шляхова дальність-висота». Інформація про функції відбиття за нахилоною та шляховою дальністю отримується класичним для РСА способом. Для отримання інформації про висоту рельєфу місцевості використовується додатковий канал вимірювання кута місця кожного елемента розрізнення [1]. В інтерферометричному режимі використовують дві антенні системи.

В радіолокаторах із синтезуванням двовимірного просторового спектру (РСДПС) віртуальна траєкторія синтезування будується навколо внутрішньої точки просторової функції відбиття рельєфу сцени зондування [2].

Точність вимірювання висоти рельєфу визначається похибкою вимірювання різниці фаз в антенах інтерферометричного радіолокатора на яку впливає точність вимірювання висоти польоту РСА – H , нахилоної дальності до елемента розрізнення – R , кутів нахилу вісі діаграми спрямованості (ДС) антен інтерферометричної РСА γ – [3].

Розрахунок і можливості зменшення похибки на точність інтерферометричних РСДПС у відомій літературі не розглянуті та, вочевидь, мають свої особливості.

Метою даної статті є визначення помилки вимірювання висоти рельєфу сцени радіолокаційного знімання залежно від збурюючих чинників і сучасної технічної точності вимірювання різниці фаз радіосигналів на просторовій частоті.

Методологія визначення точності вимірювання висоти рельєфу сцени радіолокаційного зондування.

Математичний алгоритм формування тривимірного радіолокаційного зображення (РЛЗ) сцени за методом просторових частот має такий вигляд [4]

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

$$\chi(x_2, x_3) = \pi |\alpha_D(x_2, x_3)|, \quad (2)$$

де

$$\alpha(x_2, x_3) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \operatorname{Re} \int_{p_0-\Delta p_2-\Delta p_3}^{p_0+\Delta p_2+\Delta p_3} \int_{|\sqrt{p_2^2+p_3^2}|} \frac{\rho(0, p_2, p_3)}{|\sqrt{p_2^2+p_3^2}|} e^{i(p_2 x_2 + p_3 x_3)} dp_2 dp_3 = \frac{1}{\pi} \chi(x_2, x_3) \cdot e^{ip_0 x_2}, \quad (3)$$

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

Тут $\rho(\bar{p})$ - сигнал відбиття від сцени зондування, що вимірюється на просторовій частоті; $\chi(x_2, x_3)$ – проекція функції відбиття поверхні сцени і об'єктів на ній на площину (x_2, x_3) просторової системи координат; $y(x_2, x_3)$ – рельєф місцевості відносно площини (x_2, x_3) просторової системи координат; p_0 – середнє значення просторової частоти зондування за координатою p_2 .

Вектор \bar{p} частотного простору за напрямком співпадає з одиничним вектором, що має напрям від початку координат в середині відбиваючої поверхні сцени (цілі) до точки розміщення приймача-передавача РСДПС, співпадає з центром тривимірної просторової системи координат і кількісно дорівнює

$$p = |\bar{p}| = \frac{2\omega}{c}, \quad (5)$$

де ω – кутова частота гармонічного сигналу зондування; c – швидкість світла.

Функція $\rho(\bar{p})$ відповідає прийнятому та виміряному відбитому гармонійному сигналу зондування в загальному випадку в точках сфери радіуса R навколо сцени (ділянки) радіолокаційного знімання. Центри частотної й просторової систем координат та їх вісі p_1, p_2, p_3 і x_1, x_2, x_3 , відповідно, співпадають.

У співвідношенні (4) інтегрування на обмеженій частотній площині та знаходження часткової похідної можна поміняти місцями

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

$$= e^{ip_0 x_2} \cdot \chi(x_2, x_3) \cdot x_1(x_2, x_3) = e^{ip_0 x_2} \cdot \chi(x_2, x_3) \cdot h_S(x_2, x_3) \quad (6)$$

Часткова похідна за частотною координатою p_1 у (6) дорівнює висоті кожного елемента розрізнення відображення функції відбиття $\chi(x_2, x_3)$ на площині, що визначається подвійним інтегралом від її просторового спектру, вимірюваному на частотно-обмеженій площині.

Відмітимо, що у частотному просторі просторова частота $p = \frac{2\omega}{c} \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}} \right]$ характеризує зміну фази сигналу при переміщенні його приймача у просторі на один метр.

Розглянемо, як змінюється фаза відбитого сигналу від висоти розташування блискучої точки відносно площини (x_2, x_3) відліку. Обчислення зміни фази від блискучої точки розглянемо за допомогою пояснюючого рисунку 1.

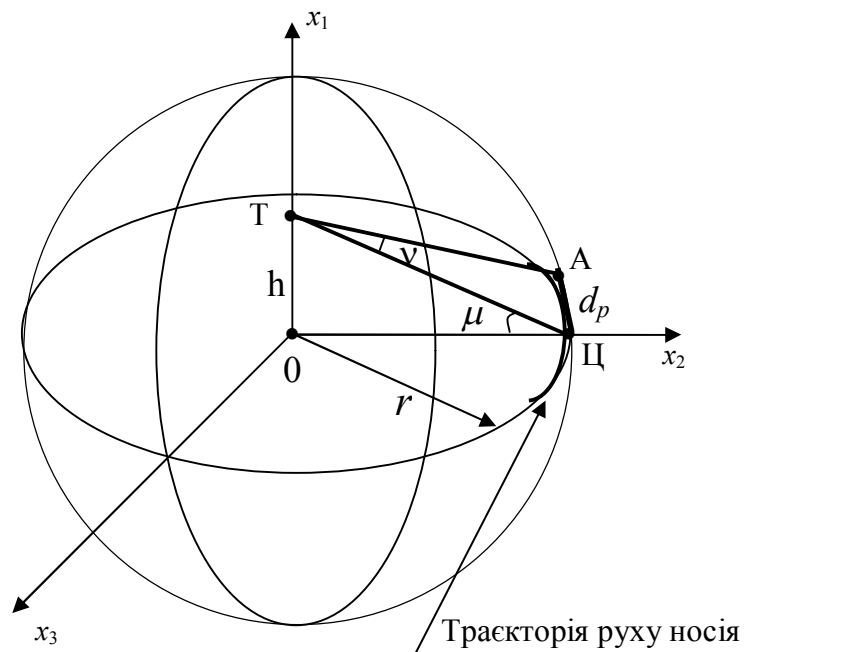


Рис. 1. До обчислення фази відбитого сигналу від блискучої точки Т сцени зондування на антенах інтерферометра (точки А і Ц)

Відрізок $(\overline{TЦ})$ дорівнює

$$(\overline{TЦ}) = \sqrt{h^2 + r^2} \quad (7)$$

При $h \ll r$

$$(\overline{TЦ}) = \sqrt{h^2 + r^2} = r \sqrt{1 + \frac{h^2}{r^2}} = r + \frac{h^2}{2r}, \quad (8)$$

а кут $\angle TЦO$ має значення

$$\angle TЦO = \mu = h/r. \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (\overline{TA})^2 &= \left(r + \frac{h^2}{2r}\right)^2 + d_p^2 - 2\left(r + \frac{h^2}{2r}\right)d_p \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{h}{r}\right) = \\ &= \left(r + \frac{h^2}{2r}\right)^2 + d_p^2 - 2d_p \frac{h}{r} \left(r + \frac{h^2}{2r}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\overline{TA} = \left(r + \frac{h^2}{r}\right) \sqrt{1 + \frac{d_p^2}{\left(r + \frac{h^2}{2r}\right)^2} - 2d_p \frac{h}{r} / \left(r + \frac{h^2}{2r}\right)} = \left(r + \frac{h^2}{r}\right) + \frac{d_p^2}{2r} + d_p \frac{h}{r}. \quad (11)$$

Зміна відстані до антен інтерферометра (точок А і Ц)

$$\Delta r = (\overline{TЦ}) - (\overline{TA}) = \frac{d_p h}{r} - \frac{d_p^2}{2r} = \frac{d_p}{r} (h + 0,5d_p). \quad (12)$$

При технічній реалізації інтерферометра вимір часткової похідної, природньо, замінюють виміром відношення малих прирощувань.

Для будь-якої блискучої точки (елемента розрізнення) сцени, що зондується, різниця у відстані до антен інтерферометра

$$\Delta r_{x_1} = \frac{d_p}{r} (h(x_2, x_3) + 0,5d_p). \quad (13)$$

Цій різниці відстаней відповідає зміна фази сигналу

$$\Delta \varphi_{x_1}(x_2, x_3) = \frac{2\omega}{c} \cdot \frac{d_p}{r} [h(x_2, x_3) + 0,5d_p]. \quad (14)$$

Прирощення просторової частоти за координатою p_1

$$\Delta p_1 = \frac{2\omega}{c} \cdot \frac{d_p}{r}. \quad (15)$$

Тоді відношення прирощування фази від кожного елемента розрізнення функції відбиття $\chi(x_2, x_3)$ сцени, що обчислена за розрахунками прийнятих сигналів антенами інтерферометра дорівнює

$$\frac{\Delta \varphi_{x_1}(x_2, x_3)}{\Delta p_1} = h(x_2, x_3) - 0,5d_p. \quad (16)$$

Точність вимірювання висоти рельєфу визначається точністю вимірювання різниці фаз прийнятого двома каналами відбитого сигналу та відповідно обробленого шляхом виконання двовимірних швидких перетворень Фур'є.

Тобто

$$\delta(h) = \frac{cr}{2\omega d_p} \delta(\varphi_{x_1}) \quad (17)$$

Порядок кількісної оцінки помилки визначення висоти рельєфу розрахуємо для типових значень частот авіаційних РЛС, дальності до ділянки, що зондується, й можливої відстані між антенами інтерферометричної РСА. Наприклад, при $f_{cp} = 10^{10}$ Гц; $r = 10$ км; $d_p = 1$ м й досягнутої точності виміру фази 10^{-3} радіана (див. [5]), оцінка похибки вимірювання висоти рельєфу буде дорівнювати

$$\delta(h) = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^4}{2 \cdot 2\pi \cdot 10^{10} \cdot 1} 10^{-3} = 0,2387 \cdot 10^{-1} = 0,024 \text{ м.} \quad (18)$$

Отже, оцінка похибки визначення висоти рельєфу в інтерферометричних радіолокаторах із синтезуванням двовимірною просторового спектру залежить від несучої частоти, відстані до сцени зйомки, відстані між антенами та досягнутої точності вимірювання фази просторового спектру. Приблизна потенційна оцінка похибки визначення висоти рельєфу в інтерферометричних РСДПС співпадає з оцінкою похибки інтерферометричних РСА, що побудовані за відомими методами й складає 2,5 см.

У той же час більш суттєвою може бути складова похибки вимірювання фази, що обумовлена відношенням сигнал/шум. Зрозуміло, що для прецензійного вимірювання висоти рельєфу допустима похибка виміру фази, яка обумовлена відношенням сигнал/шум також повинна мати значення $\delta(\varphi_{x1u}) \approx 10^{-3}$.

В РСА формується радіолокаційне зображення місцевості. При цьому для розрахунку енергетичного потенціалу станції має забезпечуватись вимірюванням сигналу від поверхні з мінімальною питомою поверхнею відбиття, яка при кутах визивання поверхні Землі $30 \dots 45^\circ$ складає 10^{-3} дБ.

Методика визначення складової похибки вимірювання фази гармонійного сигналу, що обумовлена впливом шуму, наступна:

Будемо уявляти прийнятий сигнал, як суму двох векторів – сигнального та завадового, якій обумовлюється приймачем (див. рис. 2), оскільки у НВЧ діапазоні радіохвиль, що є робочим діапазоном авіаційних РСА, зовнішнім шумом можна знехтувати, адже типові значення внутрішнього шуму ($10^{-11} \dots 10^{-12}$ Вт в сантиметровому діапазоні радіохвиль) набагато більші природного зовнішнього шуму (10^{-20} Вт) [6].

Для того щоб помилка при вимірі фази відбитого сигналу від елемента розрізнення знаходилась у допустимих межах, амплітуда відбитого сигналу U_c повинна бути набагато більшою за амплітуду шумового вектору $U_{ш}$.

При визначених значеннях U_c й $U_{ш}$ найбільше значення похибки виміру фази буде тоді, коли вектори U_c і $U_{ш}$ ортогональні. В цьому випадку похибка у визначенні фази прийнятого сигналу дорівнює

$$\delta\varphi_m = \arctg \frac{U_{ш}}{U_c}. \quad (19)$$

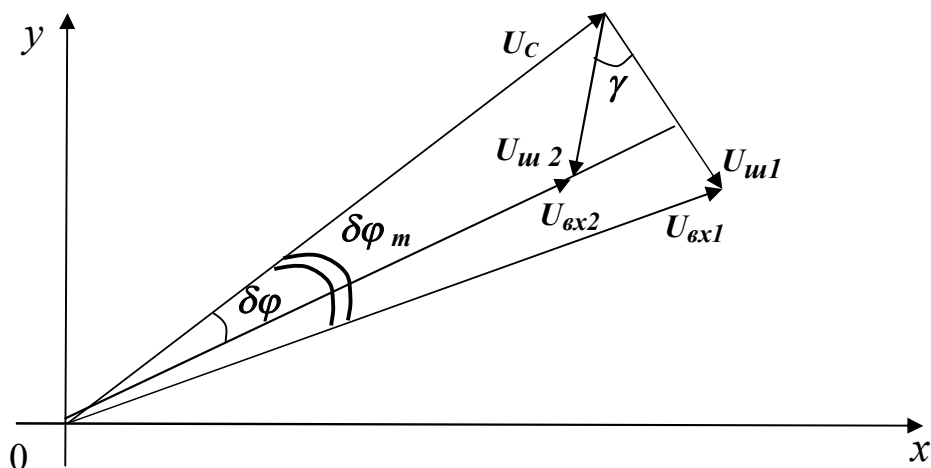


Рис. 2. Визначення похибки виміру фази, що обумовлена шумом

В тому випадку коли $U_c \gg U_w$,

$$\delta\varphi_m = \frac{U_w}{U_c}. \quad (20)$$

Коли вектори U_c та U_w не ортогональні похибка у визначенні фази зменшується. При куті між векторами шуму ортогональному сигнальному вектору і не ортогональному, що відрізняються від ортогонального напрямку на кут $\gamma < \pi/2$, його проекція на ортогональний напрямок дорівнює (див. рис.2)

$$U_{w2} = U_{w1} \cdot \cos \gamma, \quad (21)$$

а похибка у визначенні фази ($U_c \gg U_w$)

$$\delta\varphi = U_{w2} \cos \gamma / U_c = \delta\varphi_m \cdot \cos \gamma. \quad (22)$$

Математичне очікування помилки

$$MO(\delta\varphi) = \frac{2}{\pi} \delta\varphi_m. \quad (23)$$

Для всього діапазону можливих вхідних сигналів, який обумовлений діапазоном питомих значень поверхонь, що відбивають, й дорівнює 10^3 дБ.

Діапазон математичного очікування помилки визначення висоти рельєфу для діапазону відношень векторів $\bar{U}_c / \bar{U}_w = 10^2 \dots 10^5$ при їх ортогональності

$$\delta(h) = \frac{cr}{2\omega d_p} \left[\left(\frac{2}{\pi} 10^{-2} \right) \dots \left(\frac{2}{\pi} 10^{-5} \right) \right] \quad (24)$$

Наприклад, для $f_c = 10^{10}$ Гц, $r = 10^4$ м, $d_p = 0,5$ м

$$\delta(h) = 0,3 \dots 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (25)$$

Висновок. В інтерферометричних радарх абсолютна помилка точності вимірювання висоти рельєфу визначається точністю вимірювання різниці фаз сигналів від співпадаючих елементів розрізнення двох зображень сцени, що отримані в процесі обробки відбитих сигналів, які прийняті кожною з антен. Типова абсолютна похибка у визначенні висоти рельєфу, яку, без зайвих зусиль, можливо досягнути не буде перевищувати 5...10 см.

У подальших дослідженнях доцільно оцінити математичне очікування похибки вимірювання висоти рельєфу для європейського театру військових дій та оцінити похибку вимірювання висоти об'єктів штучного походження.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Федотов Б. Н. Восстановление трёхмерного рельефа местности в авиационном интерферометрическом пространственно-частотном радиолокаторе. / Б. Н. Федотов, С.А. Станкевич, Е. В. Цветков // *Електронний науковий фаховий журнал ЦАКДЗ Український журнал дистанційного зондування Землі №13, 2017*
3. Sansosti E. Geometrical SAR image registration / E. Sansosti, P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, G. Fornaro // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.– 2006.– Vol. 44.– No. 10.– P. 2861-2870.
4. Федотов Б.Н. Воспроизведение трёхмерного радиолокационного изображения сцены по методу пространственных частот / Б.Н. Федотов // *Радиотехника*.– 2014.– № 177.– С. 20-27.
5. Семенчик В.Г. Измерение комплексной амплитуды дискретизированного гармонического сигнала /В. Г. Семенчик, В. А. Пахомов //Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии: материалы международного научного конгресса 31 окт. – 3 нояб. 2011 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Минск: БГУ, 2011. – С . 481-486.
6. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.: ил. (Сер. Радиолокация).

Надійшло до редакції 15.11.2017

Рецензент: ДТН Кононов О.А.