

ing flaw detection of surfaces of industrial objects / A. A. Gundin, M. A. Gundina, A. N. Cheshkin // Science and Technology. – 2016. – V. 15. – N. 3. – P. 225–232. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-225–232.

7. Singh M. K., Chetia S. Detection and Classification of Plant Leaf Diseases in Image Processing using MATLAB // International Journal of Life Sciences Research. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 120–124.

8. Swaminathan R., Meyyappan T. Digital Image Filtering in Transform Domain using MATLAB // International Journal of Computer Applications (0975–8887). – 2017. – V. 158. – No 2. – P. 27–30.

9. Singh P. P., Singh R., Gupta B. Basic Image Processing Toolbox Functions in MATLAB for Implementation of Image Enhancement Application GUI // International Journal of Engineering Science and Computin. – 2016. – V. 6. – No 4. – P. 3945–3957.

10. Belous N. V. Aligning the background brightness of text character images with the use of a high-frequency filter / N. V. Belous, V. P. Vlasenko, A. I. Krasov // Bulletin of the Karazin Kharkiv Na-

tional University. Mat. modeling. Information Technology. Automated control systems. – 2018. – Iss. 37. – P. 5–19.

11. Sahgal D. Real-Time Vehicle Queue Detection at Urban Traffic Intersection using Image Processing / D. Sahgal, A. Ramesh, M. Parida // International Journal of Engineering Science and Generic Research. – 2018. – V. 4. – Iss. 2. – P. 12–15.

12. Rao B. J. Implementation of Image Processing Techniques using LabVIEW and MATLAB // CVR Journal of Science and Technology. – 2018. – V. 15. – P. 51–55.

13. USB Instrument Control Tutorial [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ni.com> (25.11.2019).

14. Gonzalez R. Digital image processing in MATLAB / R. Gonzalez, R. Woods, S. Eddins. – Moscow: Technosphere, 2006. – 616 p.

15. Image Processing Toolbox [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/products/image.html> (25.11.2019).

Надійшла до редакції 30.10.2019

УДК 621.396.6:621.317

Г. Д. Братченко, д.т.н., Г. Г. Смаглюк, І. С. Сеніва, Д. І. Орел

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ БЛИСКУЧИХ ТОЧОК ЦІЛІ В ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІЙ РЛС З ІСА ЗА УМОВ СКОШЕНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Розраховані залежності методичної похибки вимірювань просторових координат блискучих точок (БТ) при відновленні тривимірного радіозображення цілі за умов скошеного спостереження в інтерферометричному радіолокаторі з інверсним синтезуванням апертури. Розрахунки проведені для конкретних умов спостереження цілі на прикладі вимірювання висоти БТ для цілі, яка знаходиться в дальній зоні спостереження. Запропоновано уточнене співвідношення для розрахунку просторових координат БТ з урахуванням моделі скошеного спостереження. Співвідношення для розрахунку висоти також перевірено методом імітаційного моделювання. Отримано теоретичні залежності для оцінки середнього квадратичного відхилення (СКВ) результатів вимірювань координат БТ при різних кутах скосу. Представлені розрахункові залежності СКВ результатів вимірювань висоти БТ для двох варіантів L-конфігурації з розташування приймальних антен.

Ключові слова: *інтерферометрична РЛС з інверсним синтезуванням апертури, фазовий (інтерферометричний) метод вимірювань, тривимірне радіозображення, скошена модель спостереження, відношення сигнал-шум, методична похибка, середнє квадратичне відхилення.*

Г. Д. Братченко, д.т.н., Г. Г. Смаглюк, І. С. Сеніва, Д. І. Орел

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ БЛЕСТЯЩИХ ТОЧЕК ЦЕЛИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ РЛС С ИСА ПРИ СКОШЕННОМ НАБЛЮДЕНИИ

Рассчитаны зависимости методической погрешности измерений пространственных координат блестящих точек (БТ) при восстановлении трехмерного радиоизображения (РИ) цели для условий скошенного наблюдения в интерферометрическом радиолокаторе с инверсным синтезированием апертуры. Расчеты проведены для конкретных условий наблюдения цели на примере измерения вы-

соты БТ для цели находящейся в дальней зоне наблюдения. Предложено уточненное соотношение для расчета пространственных координат БТ с учетом модели скошенного наблюдения. Соотношение для расчета высоты также проверено методом имитационного моделирования. Получены теоретические зависимости для оценки среднего квадратического отклонения (СКО) результатов измерений координат БТ при различных углах скоса. Представлены расчетные зависимости СКО результатов измерения высоты БТ для двух вариантов L-конфигурации расположения приемных антенн.

Ключевые слова: интерферометрическая РЛС с инверсным синтезированием апертуры, фазовый (интерферометрический) метод измерений, трехмерное радиоизображение, скошенная модель наблюдения, отношение сигнал-шум, методическая погрешность, среднее квадратическое отклонение.

H. D. Bratchenko, Dsc, H. H. Smaglyuk, I. S. Seniva, D. I. Orel

3D POSITION MEASUREMENT OF TARGET'S SCATTERERS IN INTERFEROMETRIC ISAR FOR SQUINT MODEL

The restoration of 3D images of targets in the interferometric inverse synthetic aperture radars (InISAR) has been the subject of research for nearly two decades. Antennas arranged in height and horizontally are used for phase (interferometric) measurements and for adjusting the cross-range of scatterers separated by using ISAR with the broadband probing signal. In the case of an electronic beam scanning, it is possible the "squint model" of observation. This leads to additional errors.

A computational model is proposed that reproduces the geometric conditions of the target observation for two L-shape configurations of three receiving antennas in the InISAR. The model allows calculating the error of the method of measurement for the whole range of possible squint angles in the vertical and horizontal planes. The calculated dependences of the error of the method of measurement of the scatterers coordinates in the restored three-dimensional InISAR images of the targets under conditions of the squint observation model are obtained. The capabilities of the model are illustrated by calculations for specific observation conditions using the example of measuring the scatterer height, provided that the target is observed in the far-field region. The refined formula for the calculation of the height and other spatial coordinates of the scatterer, which takes into account the squint model of observation, is proposed. Results with similar order of errors also occur for measuring other spatial coordinates of the scatterer. The performance of the ratio for the calculation of altitude was also tested by simulation for the 5-point scatterer target model. Theoretical dependences were also obtained for the standard deviation (SD) estimation of the results of measurements of scatterer's coordinates at different squint angles in the vertical and horizontal planes at a fixed signal-to-noise ratio. The calculated dependencies for the SD of the results of measuring the height of the scatterer for two variants of the L-shape configurations of the receiving antennas are obtained. Recommendations are given on the possibility of combining these configurations to improve the accuracy of the measurement results.

Keywords: interferometric inverse synthetic aperture radar (InISAR), phase (interferometric) method of measurement, three-dimensional radar image, squint model, signal-to-noise ratio, standard deviation, the error of method of measurement.

[DOI 10.32684/2412-5288-2019-2-15-57-66](https://doi.org/10.32684/2412-5288-2019-2-15-57-66)

Вступ

Одновимірні, двовимірні та тривимірні радіолокаційні зображення (радіозображення) (РЗ) об'єктів можуть бути використані з метою визначення їх класу (типу) на великих відстанях та в умовах поганої метеорологічної видимості [1]. Чим краще визначено форму об'єкта, тим більшу ймовірність його розпізнавання слід очікувати. Отримання розподілу відбивальних властивостей об'єктів також є важливим для дослідження проблеми зменшення або збільшення радіолокацій-

ної помітності цілей. Тривимірне РЗ є просторовим розподілом блискучих точок (БТ) цілі, який відповідає формі об'єкта на відповідному ракурсі спостереження. Тому порівняно з одновимірними радіолокаційними дальнісними портретами (РЛДП) та з двовимірними РЗ воно може бути більш надійною ознакою розпізнавання. В той же час точність вимірювання координат БТ залежить від умов спостереження цілі та обмежень методу відновлення тривимірного РЗ, які потребують урахування для вірної інтерпретації ре-

зультатів.

Аналіз останніх публікацій та досягнень

Останні два десятиріччя активно досліджуються можливості відновлення тривимірних РЗ в радіолокаційних станціях (РЛС) з інверсним синтезуванням апертури (ІСА) за рахунок фазових вимірювань при застосуванні рознесених у просторі додаткових антен, які можуть бути тільки приймальними або ж також випромінювати ортогональні сигнали [2-17]. Такі локатори отримали назву інтерферометричних РЛС з ІСА (InISAR – interferometric inverse synthetic aperture radar). Для РЛС з ІСА є характерним вимірювання координат тільки для окремих блискучих точок (БТ) на об'єкті. Це пов'язано з чутливістю фазових вимірювань до впливу шумових завад. Крім цього, у разі електронного сканування променем антени має місце, так звана, «модель скошеного спостереження» (squint model), яка також може погіршити точність вимірювання координат БТ [6, 8, 9, 11-14]. В обзорі [8] показано наявність додаткової складової фази, яка призводить до зростання похибок вимірювання при скошеному спостереженні. Підкреслюється, що зміна фази для кожної БТ є різною, а її закон є складним. Для усунення складової методичної похибки в такій ситуації аналізуються кілька відомих методів. Так, в [6] запропоновано алгоритм обчислення тривимірних координат БТ на цілі за умов скошеного спостереження, в якому прийняті наближення щодо знаходження цілі малого розміру в дальній зоні, а також незначне її переміщення в напрямку лінії візування за час спостереження. Застосовані в [6] наближення щодо похилої дальності до цілі суттєво не впливають на результат відновлення тривимірних координат БТ. Вони отримуються в системі координат, вісі якої спрямовані паралельно осям наземної системи координат. Результати імітаційного моделювання для точкової моделі цілі якісно підтвердили добрий збіг координат значної кількості БТ з розміщенням точок в моделі за умови, що вектор напрямку візування цілі є априорі відомим. В [6], однак, відсутні чисельні оцінки відповідності координат БТ їх розміщенню в моделі.

В [11, 12] для вирішення проблеми спотворення результатів вимірювань координат БТ в горизонтальній площині в моделі скошеного спостереження зроблено спробу більш точного урахування наявної методичної похибки та її усунення. Для цього застосовується нелінійна ітераційна процедура оптимізації за критерієм найменшої квадратичної відстані (НКВ). Як і в [6], застосовується L-конфігурація з трьох антен, що розташовуються в горизонтальній площині. Для пошуку висоти БТ застосовується перетво-

рення координат за результатом вимірювання похилої дальності БТ із застосуванням широко-смугового сигналу з відповідною роздільною здатністю та координати кута місця та азимуту цілі, які вважаються відомими. Тобто фактично, як і в [6], вектор візування цілі вважається відомим. Застосування процедури НКВ оптимізації за результатами вимірювань різниць фаз окремих БТ дозволяє отримати якісні тривимірні РЗ. В той же час наведені приклади не дають можливості визначити вплив методичної похибки порівняно з іншими складовими. З [12] не ясно, який вираш щодо точності відновлення координат БТ дає запропонований метод порівняно з [6].

В [13, 14] запропоновано ітераційний метод відновлення РЗ, який має приблизно такі ж характеристики з точності вимірювання координат БТ, як й ітераційний алгоритм в [12], але за менших обчислювальних витрат.

В [9] вказується на необхідність у разі скошеної моделі спостереження проектувати площину антени InISAR на площину перпендикулярну до лінії візування. Наведені співвідношення, що застосовуються для розрахунку координат БТ фазовим методом з урахуванням поправок до розташування фазових центрів антен. Представлені в [9] результати імітаційного моделювання за умов скошеного спостереження

В розглянутих вище роботах дослідження виконувались для двох варіантів L-конфігурації приймальних антен: всі три антени розміщені в горизонтальній площині та дві антени в горизонтальній площині і одна у вертикальній. Обидві ці конфігурації застосовуються для спостереження повітряних цілей. Тому представляє інтерес оцінити можливі переваги тої чи іншої залежно від умов скошеного спостереження цілей. У розглянутих вище роботах також не представлено теоретичних оцінок методичної похибки в залежності від кута скосу і розташування БТ відносно опорної.

В [10] була запропонована методика та отримане теоретичне співвідношення для оцінювання СКВ результатів вимірювань висоти БТ. Однак в цьому співвідношенні не враховувалась модель скошеного спостереження. Отримані в [10] результати імітаційного моделювання вимірювання висоти БТ не відповідають дійсним її значенням з наближенням цілі до РЛС, тобто за умов скошеного спостереження, і потребують уточнення.

Метою роботи є отримання оцінок методичної похибки вимірювань просторових координат БТ при відновленні тривимірного РЗ, а також теоретичних співвідношень для оцінки середнього квадратичного відхилення (СКВ) результатів

вимірювань координат БТ за умов скошеного спостереження для двох варіантів L-конфігурації розташування приймальних антен.

Викладення основного матеріалу

Розглянемо задачу відновлення тривимірних РЗ в інтерферометричній РЛС з ІСА.

В РЛС з ІСА при рівномірному прямолінійному русі цілі з відомим напрямом і швидкістю руху потрібна роздільна здатність у напрямку поперечному до лінії візування забезпечується вибором часу спостереження. За цей час ціль розвертається на кут $\Delta\theta$, і роздільна здатність складає [18]

$$\delta R_n = \frac{\lambda}{2\Delta\theta}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі РЛС.

Роздільна здатність у напрямку лінії візування визначається співвідношенням [19]

$$\delta R = \frac{c}{2\Pi_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль;

$\Pi_{\text{эф}}$ – ефективна ширина спектру сигналу, яка у випадку застосування зондувальних широкопосмугових лінійно-частотно-модульованих (ЛЧМ) радіопульсів приблизно дорівнює дев'яти частоті Δf .

Для вимірювання третьої координати (висоти) розділених у площині БТ може бути застосований фазовий метод вимірювання. Для цього принципово достатньо мати один додатковий приймальний канал з антеною піднятою за висотою відносно приймально-передавальної антени. В той же час, якщо масштаб двовимірного РЗ за поперечною дальністю точно не відомий, координата БТ може бути уточнена фазовим методом вимірювань при введенні додаткового приймального каналу з антеною, що рознесена по відношенню приймально-передавальної в напрямку поперечної дальності. Така L-конфігурація досліджувалась, наприклад в [9] для отримання тривимірних РЗ повітряних і надводних цілей. В роботах [6, 11-14] досліджено L-конфігурацію з трьох антен в горизонтальній площині для спостереження космічних та повітряних цілей. У будь-якому разі потрапляння двох і більше БТ в один елемент розділення на двовимірному РЗ призводить до неможливості коректного вимірювання фаз окремих БТ (так званий *glint effect*). Така ситуація в представленій роботі не розглядається. Дослідження точності вимірювання про-

сторових координат стосується лише ізольованих БТ в елементі розділення.

Оскільки фазові вимірювання для окремих приймальних каналів виконуються незалежно, розглянемо спочатку випадок «скошеного спостереження» цілі у вертикальній площині. Тобто ціль рухається уздовж вісі координат OZ , а її спостереження розпочинається в момент часу, коли відрізок, що поєднує дві антени лежить в площині xoy (рис. 1). Кут азимуту в такому випадку $\beta = 0$. При цьому умови спостереження дозволяють вважати, що ціль перебуває в дальній зоні. За таких умов є прийнятним наближення щодо паралельності променів антен 1 і 2 у напрямку опорної БТ 2. Фаза опорної БТ зазвичай дорівнює 0 в усіх приймальних каналах, тому антени 1 і 2 відносно БТ 2 мають бути розташовані на однаковій відстані R_0 , яка на рис. 1 відраховується від точки посередині між антенами 1 і 2. При куті місця цілі ϵ , який в цьому випадку є кутом «скошеного спостереження», відстань між антенами фактично складе $h_a \cos \epsilon$ замість вихідної відстані h_a (рис. 1).

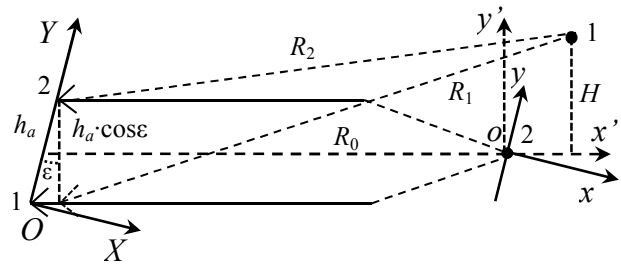


Рисунок 1 – Спостереження двох БТ двома антенами у вертикальній площині

з урахуванням прийнятого наближення порівняно з виразом для обчислення висоти БТ 1, що не враховує модель скошеного спостереження [10, 13], маємо

$$H = \frac{\lambda(\varphi_1 - \varphi_2)}{2\pi} \frac{(R_1 + R_2)}{2h_a \cos \epsilon}, \quad (3)$$

де H – висота БТ 1;

φ_1 та φ_2 – виміряні початкові фази БТ для РЗ отриманих від першого та другого елементів антени;

R_1 та R_2 – відстані від першої та другої антен до БТ 1 вздовж лінії візування.

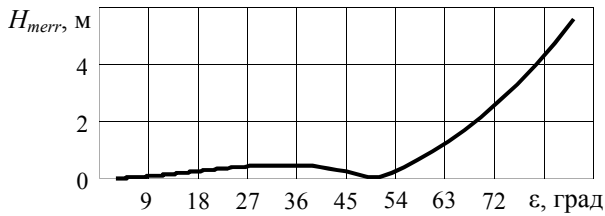
Корегування співвідношення для оцінки висоти БТ 1 полягає, таким чином, у діленні відомого співвідношення на косинус кута місця ϵ . Для порівняння виміряних згідно співвідношення

(3) та за рахунок високого розділення уздовж лінії візування спрямованої уздовж осі ox' координат БТ 1 в системі координат $x'oy'$ з відомими її координатами в системі координат $хоу$ потрібно виконати поворот осей системи $x'oy'$ по годинниковій стрілці на кут ε із застосуванням матриці повороту

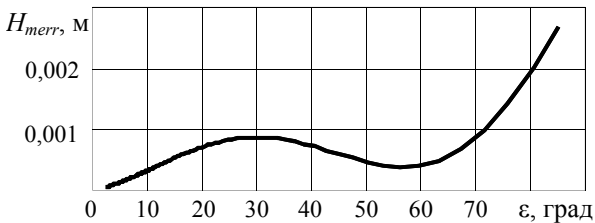
$$M(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix}.$$

У вихідному положенні системи координат $хоу$ вісь ou спрямована вертикально, тоді як вісь ox – горизонтально (рис. 1).

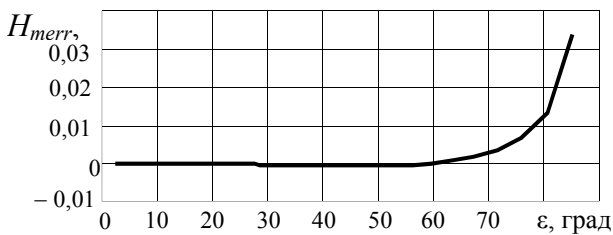
Графіки на рис. 2, б ілюструють суттєве зменшення методичної похибки при скошеному спостереженні цілі із застосуванням співвідношення (3) порівняно з випадком, коли не враховується кут скосу (рис. 2, а).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Розрахункові залежності методичної похибки результатів вимірювань висоти БТ в залежності від кута місця цілі: без урахування кута скосу (а); згідно співвідношення (3) з порівнянням в системі координат $хоу$ (б) та в системі координат $x'oy'$ (в)

Графіки побудовані за умови, що БТ 1 має координати (6,43, 7,66) м в системі координат $хоу$, тобто довжина радіус-вектора ρ від т. o до БТ 1 складає 10 м. Зміна кута місця в межах від 85,236 до 2,291 градусів забезпечується для дальностей спостереження цілі уздовж горизонтальної площини від 0,5 до 150 км та висоті її польоту 8 км. Відстань між приймальними антенами складала $h_a = 1,75$ м.

Порівняння висоти БТ 1 з очікуваним її значенням може бути також виконане в системі координат $x'oy'$. Вихідні координати БТ 1 в системі координат $x'oy'$ у цьому випадку обчислюються шляхом повороту системи координат $хоу$ із застосуванням матриці $M^T(\varepsilon)$, де T – є знаком транспонування. Результат розрахунку в середовищі MathCad поданий на рис. 2, в показує дещо більші відхилення результатів вимірювання висоти при великих кутах місця порівняно з рис. 2, б, але менші при малих кутах місця. У будь-якому з цих випадків методична похибка при кутах місця менших за 65 градусів складає долі міліметра. При збільшенні довжини радіус-вектора ρ значення похибки при куті місця 85,236 градусів зростає приблизно за квадратичним законом.

Отримані результати імітаційного моделювання, які підтвердили працездатність співвідношення (3) та дозволили уточнити результати моделювання представлені в [10]. Модель вторинного випромінювання, яка застосовується при імітаційному моделюванні, складається з п'яти ізотропних точкових відбивачів на поверхні та в геометричному центрі куба з ребром 16 м. Дві БТ розміщуються на ближній до РЛС грані у вершинах нижнього ребра, дві у вершинах верхнього ребра на протилежній грані та одна БТ – в його геометричному центрі. На рис. 3 представлені графіки для восьми значень відстані до цілі уздовж горизонтальної площини: 16, 24, 32, 48, 64, 80, 96 та 112 км при висоті польоту цілі 8 км на ракурсі її спостереження близькому до 90°. Відношення сигнал-шум при моделюванні задавалось рівним близько 100 дБ на один РЛДП цілі.

З графіків на рис. 3 видно, що теоретична та отримана методом імітаційного моделювання криві є близькими на всіх відстанях спостереження цілі. Максимальне відхилення складає близько 9 см, що пояснюється наявністю додаткової похибки за рахунок не точного суміщення максимумів піків на зображеннях в двох приймальних каналах при роздільній здатності лінійно-частотно-модульованого (ЛЧМ) сигналу близько 1 м. Середнє значення відхилення складає близько 3 см.

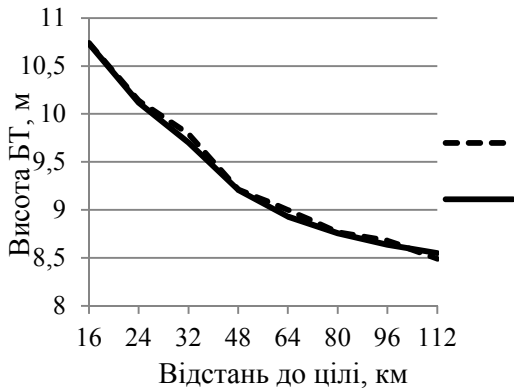


Рисунок 3 – Залежності висоти БТ 1 відносно лінії візування від відстані до радіолокатора (1 – результати імітаційного моделювання вимірювань, 2 – теоретичні розрахунки [10])

Таким чином, методична похибка вимірювання висоти БТ при скошеному спостереженні згідно співвідношення (3) може бути прийнятною для більшої частини діапазону кутів скосу.

В той же, на відміну від отриманого в [10] співвідношення для оцінки СКВ результатів вимірювань висоти

$$\sigma_H = \frac{\lambda \sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot h_a} \cdot \sqrt{\sigma_\varphi^2 \cdot (R_2 + R_1)^2 + \sigma_R^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)^2}, \quad (4)$$

де σ_φ та σ_R – СКВ результатів вимірювань фази та дальності уздовж лінії візування відповідно, з урахуванням СКВ результатів вимірювань кута місця за методикою, яка описана [10], отримуємо

$$\sigma_{H1}^2 = \frac{\sigma_H^2}{\cos^2 \varepsilon} + \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot h_a \cdot \cos \varepsilon} \right)^2 \times (R_2 + R_1)^2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 \cdot \text{tg}^2 \varepsilon, \quad (5)$$

де σ_{H1} – СКВ результатів вимірювань висоти БТ при скошеному спостереженні згідно співвідношення (3);

σ_ε – СКВ результатів вимірювань кута місця цілі.

В подальших розрахунках σ_φ та σ_R обчислюються за тими ж співвідношеннями, що й в [10]. Середнє квадратичне відхилення σ_ε задається згідно співвідношення для обчислення потенційної точності вимірювань для антенної решітки з двох елементів [19]

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{ql_{\text{еф норм}}}, \quad (6)$$

$$\text{де } l_{\text{еф норм}} = \pi \cdot \frac{h_a}{\lambda} \cdot |\cos \varepsilon| - \text{нормована по відношенню до довжини хвилі ефективна довжина антенного розкриття.}$$

У разі виконання повороту системи координат $x'oy'$ висота БТ 1 визначена в системі координат xoy матиме вигляд

$$H_\varepsilon = R \sin \varepsilon + H_0, \quad (7)$$

де R – проекція радіус-вектора $\vec{\rho}$ на лінію візування: $R = \vec{r}_0 \vec{\rho}$, \vec{r}_0 – одиничний вектор лінії візування у напрямку БТ 2.

$H_0 = H \cos \varepsilon$ – висота БТ без урахування кута скосу.

Згідно з формулою (7) отримуємо дисперсію результатів вимірювання висоти БТ

$$\sigma_{H_\varepsilon}^2 = \sigma_H^2 + \sigma_R^2 \sin^2 \varepsilon + \sigma_\varepsilon^2 \cdot R^2 \cdot \cos^2 \varepsilon, \quad (8)$$

де σ_{H_ε} – СКВ результатів вимірювань висоти БТ в системі координат xoy .

На рис. 4 представлені теоретичні залежності побудовані за формулами (4), (5) та (8) при відношенні сигнал/шум близько 60 дБ для окремої БТ. Як і в [10], розрахунки виконані за умови застосування в РЛС зондувального ЛЧМ сигналу з дев'ятию частоти 150 МГц. Умови спостереження цілі такі ж як і при отриманні графіків на рис. 2.

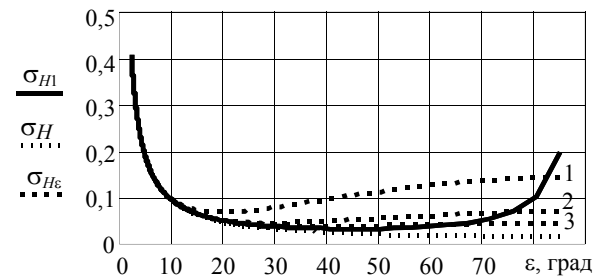


Рисунок 4 – Теоретичні залежності СКВ результатів вимірювання висоти БТ 1 в метрах (криві σ_{H_ε} для дискретності відліків по дальності: 1 – 0,5 м; 2 – 0,25 м; 3 – 0,125 м)

З рис. 4 видно, що випадкова складова похибки вимірювань є найбільшою при малих кутах місця (скосу). Вона також зростає при кутах місця більших за 70 градусів у випадку вимірювання висоти БТ згідно співвідношення (3), СКВ результатів вимірювань σ_{H1} .

Найбільшу частку у всіх трьох випадках вносить складова СКВ, пов'язана з СКВ резуль-

татів вимірювань фаз σ_φ (4).

При застосуванні трьох приймальних антен, які утворюють L-конфігурацію у вертикальній площині з'являється додаткова можливість вимірювання поперечної дальності БТ фазовим методом. Третя антена відстоїть від антени 1 у напрямку осі OZ , яка утворює з осями OX та OY (рис. 1) правосторонню систему координат, на відстань h_g . На рис. 1 вісь OZ не показано. Співвідношення для визначення поперечної дальності є подібним до (3)

$$Z_{BP} = \frac{\lambda(\varphi_1 - \varphi_3)(R_1 + R_3)}{2\pi \cdot 2h_g \cos\beta}, \quad (9)$$

де β – кут азимуту, на якому спостерігається ціль, який відрховується від осі OX по часовій стрілці в площині XOZ ;

φ_3 та R_3 – виміряна початкова фаза БТ 1 для РЗ отриманого в приймальному каналі третьої антени та відстань цієї антени до БТ 1 вздовж лінії візування відповідно.

Результати розрахунків σ_{Z1} у порівнянні з σ_{H1} представлені на рис. 5 отримані згідно співвідношення подібного до (4) та (5) із заміною кута ε на β та вимірної фази φ_2 на φ_3 та R_2 на R_3 також при відношенні сигнал/шум 60 дБ.

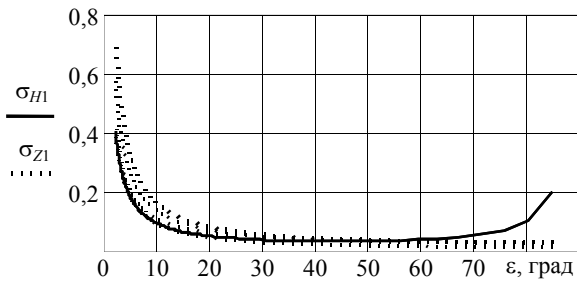


Рисунок 5 – Теоретичні залежності СКВ результатів вимірювання висоти БТ 1: суцільна крива σ_{H1} така ж, як на рис. 3; крапкові криві σ_{Z1} для кутів β : 0° ; 15° ; 45° та 55°

Як видно з рис. 5, СКВ зростає при збільшенні кута скосу β в горизонтальній площині при спостереженні цілі й більш суттєво на малих кутах місця (приблизно в 1,74 рази при $\beta = 55^\circ$). В той же час на кутах місця більших за 45° σ_{Z1} є меншою, ніж при вимірюванні висоти БТ згідно (3). Зменшення СКВ при вимірюванні можливе за рахунок збільшення відстані між антенами з

урахуванням умови однозначного вимірювання різниці фаз [6].

Вимірювання висоти БТ можливо виконувати при розташуванні антен у вигляді L-конфігурації в горизонтальній площині [6, 11-14]. Координата у БТ в цьому випадку обчислюється за результатами вимірювань координат x, z , вектора \vec{r}_0 та проекції радіус-вектора $\vec{\rho}$ на лінію візування R . Рішення, що отримується з рівняння $R = \vec{r}_0 \vec{\rho}$, в якому $\vec{r}_0 = (\cos \varepsilon \cdot \cos \beta \quad \sin \varepsilon \quad \cos \varepsilon \cdot \sin \beta)^T$ і $\vec{\rho} = (x \quad y \quad z)^T$, має вигляд

$$H_\beta = R/\sin \varepsilon - R \cos \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon - (Z_{BP} \cos \beta + X_{BP} \sin \beta) \operatorname{ctg} \varepsilon \cdot \sin \beta, \quad (10)$$

де H_β – висота БТ 1 (координата у);

$$X_{BP} = \frac{\lambda(\varphi_1 - \varphi_4)(R_1 + R_4)}{2\pi \cdot 2h_x \sin \beta} - \text{результат ви-}$$

мірювання координати x БТ 1 із застосування додаткової антени, яка відстоїть від антени 1 на відстань h_x уздовж осі OX (рис. 1).

Співвідношення для обчислення СКВ H_β згідно з (10) легко отримати за тією ж методикою, що наведена в [10]. Воно, однак, є доволі громіздким і тому обмежимося прикладами графічних залежностей σ_{H_β} для різних кутів скосу β (рис. 6) і дискретності відліків по дальності 0,25 м.

Як видно з рис. 6 СКВ σ_{H_β} і σ_{H_ε} при великих кутах скосу ε мають близькі значення, які можуть бути зменшені при збільшенні дискретності відліків по дальності (див. рис. 4). При малих кутах ε при скошеному спостереженні СКВ результатів вимірювань згідно (10) матиме значно більші значення, ніж при вимірюваннях з антеною піднятою за висотою. Слід зазначити, що й методична похибка на малих кутах місця в цьому випадку також є більшою. В той же час на при великих кутах місця (приблизно більше 45°) вона виявляється меншою, ніж у випадку вимірювання згідно (7). Таким чином, в деяких випадках було б доцільно комбінувати дві L-конфігурації для підвищення точності визначення координат БТ, застосовуючи на великих кутах місця алгоритм визначення висоти (10).

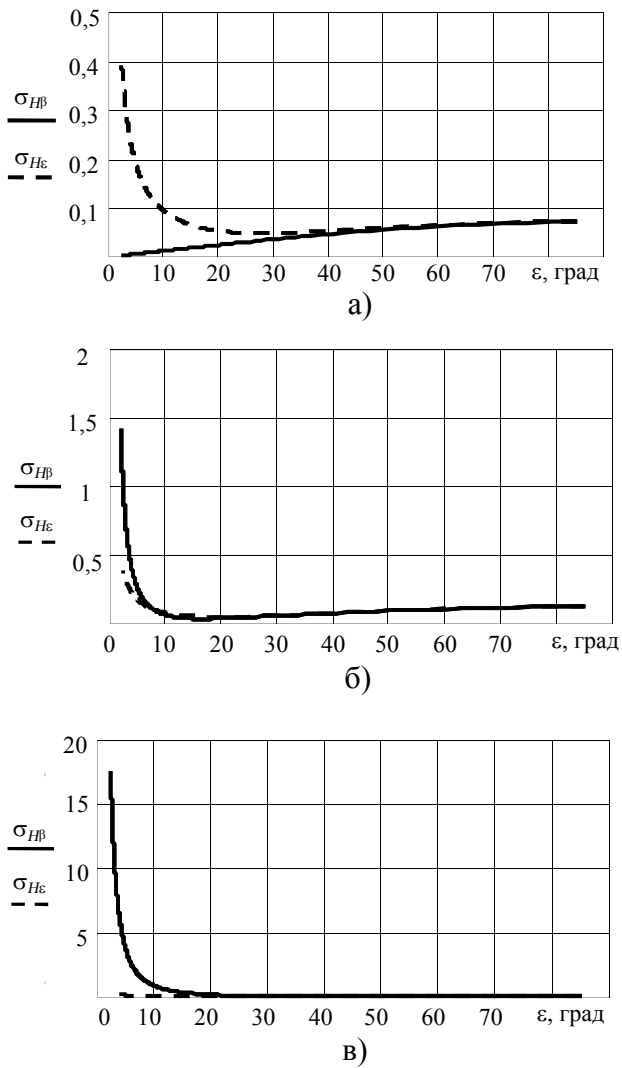


Рисунок 6 – Теоретичні залежності СКВ $\sigma_{H\beta}$ і $\sigma_{H\epsilon}$ результатів вимірювання висоти БТ 1: суцільна крива для кутів β : а) 0° ; б) 5° ; в) 85°

Висновки

В представленій роботі отримані розрахункові оцінки методичної похибки вимірювань просторових координат БТ при відновленні тривимірного РЗ в інтерферометричній РЛС з ІСА за умов скошеного спостереження для двох варіантів L-конфігурації шляхом відтворення геометричних умов спостереження. Розрахункова модель дозволяє обчислювати методичну похибку для всього діапазону можливих кутів скосу як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Можливості застосування моделі ілюструються прикладами розрахунків за конкретних умов спостереження на прикладі вимірювання висоти БТ за умови, що ціль перебуває в дальній зоні спостереження. Для цього випадку отримане уточнене співвідношення для розрахунку висоти та інших просторових координат БТ, що урахо-

вує модель скошеного спостереження. Близькі за порядком значень результати отримані іакож при вимірюваннях інших просторових координат БТ. Працездатність уточненого співвідношення для розрахунку висоти перевірена методом імітаційного моделювання на прикладі відновлення тривимірного РЗ моделі цілі з 5 точкових відбивачів.

Також отримані теоретичні залежності для оцінки СКВ результатів вимірювань координат БТ при різних кутах скосу у вертикальній та горизонтальній площині та відношеннях сигнал-шум. Представлені розрахункові залежності СКВ вимірювання координат БТ на прикладі вимірювання висоти для двох варіантів L-конфігурації при розташуванні приймальних антен. Надані рекомендації щодо можливості комбінування цих конфігурацій. При цьому при великих кутах місця доцільно застосовувати L-конфігурацію з розміщенням антен в горизонтальній площині. Для малих кутів місця кращі точнісні характеристики матиме L-конфігурація з розміщенням у вертикальній площині.

Список використаних джерел

1. Ширман Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лешенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 3–63.
2. Soumekh M. Automatic aircraft landing using interferometric inverse synthetic aperture radar imaging, IEEE Trans. Image Process., Sep. 1996, Vol. 5, No. 9, pp. 1335–1345.
3. Wang G., Xia X., Chen V. C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering target using three receivers, IEEE Trans. Image Process., vol. 10, no. 3, Mar. 2001, pp. 436–447.
4. Xu X., Narayanan R. M. Three dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling, IEEE Trans. Image Process., vol. 10, no. 7, Jul. 2001, pp. 1094–1102.
5. Felguera-Martín D., González-Partida J.-T., Almorox-González P., Burgos-García M., Dorta-Naranjo B.-P. Interferometric inverse synthetic aperture radar experiment using an interferometric linear frequency modulated continuous wave millimetre-wave radar, IET Radar, Sonar & Navigation, Volume 5, Issue 1, 2011, p. 39–47.
6. Ma C. Z., Yeo T. S., Tan H. S., et al., Inter-

ferometric ISAR imaging on squint model, *Progress electromagn. res. lett.*, 2(2008), pp. 125–133.

7. Liu C. L., Gao X. Z., Jiang W. D., and Li X. Interferometric ISAR three-dimensional imaging using one antenna, *Progress In Electromagnetics Research M*, 2011, Vol. 21, pp. 33–45.

8. Tian Biao, Lu Zhejun, Liu Yongxiang, Li Xiang. Review on interferometric ISAR 3D imaging: concept, technology and experiment, *Signal Processing* 153 (2018), 164–187, journal homepage: www.elsevier.com/locate/sigpro.

9. M. Martorella, D. Staglianò, F. Salvetti, F. Berizzi. 17 Jun 2016, 3D interferometric ISAR from: radar imaging for maritime observation, CRC Press Accessed on: 09 Jan 2019, <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/9781315374253-8>.

10. Bratchenko H. D., Smaglyuk H. H., Grygoriev D. V., Plotnik A. I. 3D position measurement simulation of air target's scatterers in interferometric ISAR // *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. – Одеса, 2017. – Вип. 2(11). – С. 58–64.

11. Liya Li, Liu H., Bo J., et al. An Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm For Squint Model (in Chinese), *J. Xian Jiaotong Univ.* (2008).

12. Liu C.L., He F., Gao X.Z., et al., Squint-mode InISAR Imaging Based on Nonlinear Least Square and Coordinates Transform, *Sci. China Technol. Sci.* 54 (12) (2011) 3332–3340.

13. Tian B., Zou J., Xu S., et al. Squint model interferometric ISAR imaging based on respective reference range selection and squint iteration improvement, *Radar & Sonar Navig. IET* 9 (9) (2015), 1366–1375.

14. Tian B., Liu Y., Tang D., et al. Interferometric ISAR Imaging for space moving targets on a squint model using two antennas, *J. Electromagn. Waves Appl.* 28 (17) (2014), pp. 2135–2152.

15. Staglianò D., Giusti E., Lisci S., Martorella M. Bistatic three-dimensional interferometric ISAR, *IET Radar Sonar Navig.* vol. 10 (1) (2016), pp. 63–75.

16. Staglianò D., M. Martorella, Casalini E. Interferometric bistatic ISAR processing for 3D target reconstruction, in: *Proceedings of the 2014 Eleventh European Radar Conference, Rome, 2014*, pp. 161–164.

17. Qiu W., Martorella M., Berizzi F. Interferometric ISAR imaging based on compressive sensing, 2nd International Workshop on Compressed Sensing (CoSeRa 2013), 17-19 September 2013, Bonn, Germany, https://workshops.fhr.fraunhofer.de/cosera/cosera2013/pdf/A7_3.pdf

18. Wehner D. R. *High Resolution Radar*. – Norwood: Artech House, 1987.

19. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

References

1. Shirman Ya.D. Metody radiolokacionnogo raspoznavaniya i ix modelirovanie / Ya. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. P. Leshhenko, G. D. Bratchenko, V. M. Orlenko // *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspexi sovremennoj radioelektroniki*. – 1996. – № 11. – S. 3-63.

2. Soumekh M. Automatic aircraft landing using interferometric inverse synthetic aperture radar imaging, *IEEE Trans. Image Process.*, Sep. 1996, Vol. 5, No. 9, pp. 1335-1345.

3. Wang G., Xia X., Chen V. C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering target using three receivers, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 3, Mar. 2001, pp. 436–447.

4. Xu X., Narayanan R. M. Three dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 7, Jul. 2001, pp. 1094–1102.

5. Felguera-Martín D., González-Partida J.-T., Almorox-González P., Burgos-García M., Dorta-Naranjo B.-P. Interferometric inverse synthetic aperture radar experiment using an interferometric linear frequency modulated continuous wave millimetre-wave radar, *IET Radar, Sonar & Navigation*, Volume 5, Issue 1, 2011, p. 39 – 47.

6. Ma C. Z., Yeo T. S., Tan H. S., et al., Interferometric ISAR imaging on squint model, *Progress electromagn. res. lett.*, 2 (2008), pp. 125–133.

7. Liu C. L., Gao X. Z., Jiang W. D., and Li X. Interferometric ISAR three-dimensional imaging using one antenna, *Progress In Electromagnetics Research M*, 2011, Vol. 21, pp. 33–45.

8. Tian Biao, Lu Zhejun, Liu Yongxiang,

- Li Xiang. Review on interferometric ISAR 3D imaging: concept, technology and experiment, *Signal Processing* 153 (2018), 164–187, journal homepage: www.elsevier.com/locate/sigpro.
9. M. Martorella, D. Staglianò, F. Salvetti, F. Berizzi. 17 Jun 2016, 3D interferometric ISAR from: radar imaging for maritime observation, CRC Press Accessed on: 09 Jan 2019, <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/9781315374253-8>.
10. Bratchenko H. D., Smaglyuk H. H., Grygoriev D. V., Plotnik A. I. 3D position measurement simulation of air target's scatterers in interferometric ISAR // *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï derzavnoï akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. – Odesa, 2017. – Vyp. 2(11). – P. 58–64.
11. Liya Li, Liu H., Bo J., et al. An Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm For Squint Model (in Chinese), *J. Xian Jiaotong Univ.* (2008).
12. Liu C. L., He F., Gao X. Z., et al., Squint-mode InISAR Imaging Based on Nonlinear Least Square and Coordinates Transform, *Sci. China Technol. Sci.* 54 (12) (2011) 3332–3340.
13. Tian B., Zou J., Xu S., et al. Squint model interferometric ISAR imaging based on respective reference range selection and squint iteration improvement, *Radar & Sonar Navig. IET* 9 (9) (2015), 1366–1375.
14. Tian B., Liu Y., Tang D., et al. Interferometric ISAR Imaging for space moving targets on a squint model using two antennas, *J. Electromagn. Waves Appl.* 28 (17) (2014), pp. 2135–2152.
15. Staglianò D., Giusti E., Lischi S., Martorella M. Bistatic three-dimensional interferometric ISAR, *IET Radar Sonar Navig.* vol. 10 (1) (2016), pp. 63–75.
16. Staglianò D., M. Martorella, Casalini E. Interferometric bistatic ISAR processing for 3D target reconstruction, in: *Proceedings of the 2014 Eleventh European Radar Conference, Rome, 2014*, pp. 161–164.
17. Qiu W., Martorella M., Berizzi F. Interferometric ISAR imaging based on compressive sensing, *2nd International Workshop on Compressed Sensing (CoSeRa 2013)*, 17-19 September 2013, Bonn, Germany, https://workshops.fhr.fraunhofer.de/cosera/cosera2013/pdf/A7_3.pdf
18. Wehner D.R. *High Resolution Radar*. – Norwood: Artech House, 1987.
19. Shirman Ya. D. *Teoriya i texnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomex / Ya. D. Shirman, V. N. Manzhos*. – M.: Radio i svyaz', 1981. – 416 s.

Надійшла до редакції 19.09.2019