

УДК 528.8.044.2:621.396

Оцінка точності вимірювання енергії відбиття земної поверхні в радіолокаторах із синтезованою апертурою

Л. М. Артюшин¹, С. А. Станкевич^{2*}, Б. М. Федотов³¹ Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна² ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, Україна³ Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ, Україна

В статті оцінено складову похибки виміру енергії відбиття від елементів розрізнення, яка обумовлена боковими пелюстками діаграми спрямованості в радіолокаційних станціях із синтезуванням апертури. Визначено оцінку математичного очікування цієї похибки. На основі типової класифікації земних покриттів для території України розраховано математичне очікування величини питомої відбивної здатності від елемента розрізнення земної поверхні в процесі синтезування апертури. Статистично оцінено точність виміру функції відбиття від областей з локальними неоднорідностями.

Ключові слова: радіолокатор із синтезованою апертурою, діаграма спрямованості, бокові пелюстки, відбивна здатність, класифікація земних покриттів

© Л. М. Артюшин, С. А. Станкевич, Б. М. Федотов. 2016

Сучасні радіолокаційні станції із синтезуванням апертури (РСА) знаходять широке застосування в багатьох природоресурсних, наукових та спеціальних задачах дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [10]. Радіолокаційні зображення земної поверхні несуть важливу інформацію про властивості та стан ландшафтів, сільськогосподарських угідь, екосистем, природних та антропогенних об'єктів і процесів [7]. Сучасні радіолокаційні системи ДЗЗ забезпечують високу просторову розрізненість, широкі смуги огляду (рис. 1), оперативність надання видо-

вої інформації, незалежність від часу доби та погодних умов [6, 8]. Необхідність одержання фізичних та біофізичних параметрів земних покриттів вимагає прецизійних вимірювань відбитих радіолокаційних сигналів. Умови радіолокаційного знімання привносять чисельні похибки до зареєстрованих величин радіолокаційного відбиття, однієї з яких є вплив бокових пелюсток діаграми спрямованості (ДС) [3]. Помилка виміру відбиття земної поверхні в РСА визначається рівнем завади, що складається з теплового шуму та сигналів від сусідніх елементів каналу на-

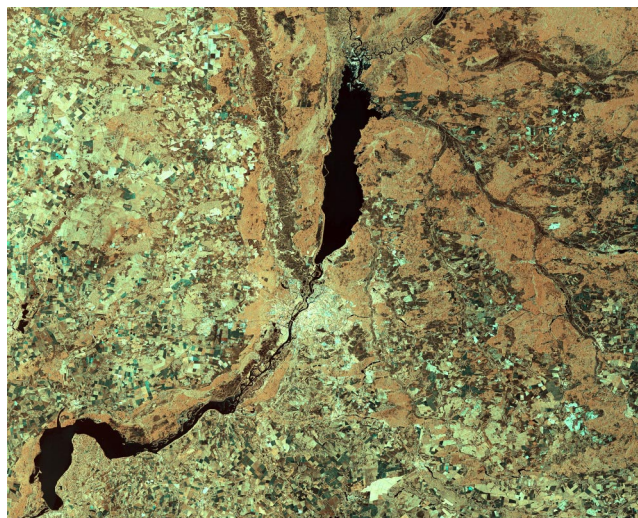


Рис. 1. Двополяризаційне радіолокаційне зображення земної поверхні супутникової системи ДЗЗ Sentinel-1A Київ, 22 серпня 2016, просторова розрізненість 10 м, режим IW GRD з фільтрацією спекл-шумів

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

хилої дальності, які обумовлено боковими пелюстками синтезованої ДС.

Відомо, що функція розподілу амплітуди поля по розкритті синтезованої апертури $D(x)$ з урахуванням форми ДС приймально-передавальної антени, усереднення відбитого сигналу по апертурі антени та впливу сферичності фронту хвилі, має вигляд [5]

$$D(x) = \sum_{i=1}^9 A_i \left[\frac{\sin(x+a_i)}{x+a_i} + \frac{\sin(x-a_i)}{x-a_i} \right], \quad (1)$$

де $x = \frac{pL}{\lambda} \sin \theta$ — узагальнена координата, L — довжина синтезованої апертури, λ — середня довжина хвилі зондувального сигналу, θ — напрям візування ДС, $a_1 = 0,87$, $a_2 = 0,87 + \frac{p}{2}$, $a_3 = 0,87 - \frac{p}{2}$, $a_4 = 0,87 + 2 \cdot 0,88$, $a_5 = 0,87 - 2 \cdot 0,88$, $a_6 = 0,87 + 2 \cdot 0,88 - \frac{p}{2}$, $a_7 = 0,87 - 2 \cdot 0,88 + \frac{p}{2}$, $a_8 = \frac{p}{2} + 0,87 - 2 \cdot 0,88$, $a_9 = \frac{p}{2} + 0,87 + 2 \cdot 0,88$, $A_1 = 0,25$, $A_2 \dots A_5 = 0,125$, $A_6 \dots A_9 = 0,0625$.

Для кутів синтезування менше за 15°

$$\theta \approx \frac{\lambda}{pL} x. \quad (2)$$

Для оцінки точності виміру функції відбиття від елемента розрізнення буде використано діаграму спрямованості синтезованої апертури і статистичні характеристики поверхонь Землі та об'єктів, що розташовані на ній. Оцінюватимуться складова похибки виміру, яка обумовлена боковими пелюстками синтезованої ДС антени РСА. Фрагмент синтезованої ДС, аналітично визначений співвідношенням (1), наведено на рис. 2, узагальнену координату x відображено в масштабі 1:5.

Розрізняювальна здатність за шляховою дальністю дорівнює [4]

$$\delta \approx \frac{\lambda}{2\beta}, \quad (3)$$

де β — кут синтезування апертури.

Для забезпечення розрізненості $10 \pi \text{ см}$ кут синтезування при $\lambda = \pi \text{ см}$ дорівнюватиме

$$\beta = \frac{\lambda}{2\delta} = \frac{p \cdot 10^{-2}}{2p \cdot 10^{-1}} = 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ рад} \approx 2,86^\circ. \quad (4)$$

На дальності 10 км довжина синтезованої апертури буде 500 метрів, коефіцієнт звуження променю — $1,666$, а кількість бокових пелюсток складатиме не менше за декілька сотень.

Вплив сигналів від бокових пелюсток буде визначати похибку вимірюваного сигналу, прийнятого головною пелюсткою ДС синтезованої апертури РСА. Для оцінки цієї похибки вважається, що площа головної пелюстки відповідає енергії вимірюваного сигналу, а сигнали бокових пелюсток визначаються їх площею і питомою відбивною здатністю елементів поверхні на інтервалі синтезування апертури. При цьому сигнали сусідніх бокових пелюсток відрізняються по фазі на 180° , тобто їх вплив на сигнал від елемента розрізнення, що вимірюється, урахуванням фази частково компенсується. Крім того, для оцінки похибки виміру треба визначити математичне очікування відбивної здатності сусідніх елементів та середнє абсолютне відхилення від цього значення.

На основі відомих експериментальних досліджень питомих відбивних здатностей різних поверхонь σ_i для кута візування $\alpha = 20^\circ$ [1, 4, 9] та їх процентного співвідношення в межах території Украї-



Рис. 2. Теоретична форма діаграми спрямованості синтезованої апертури

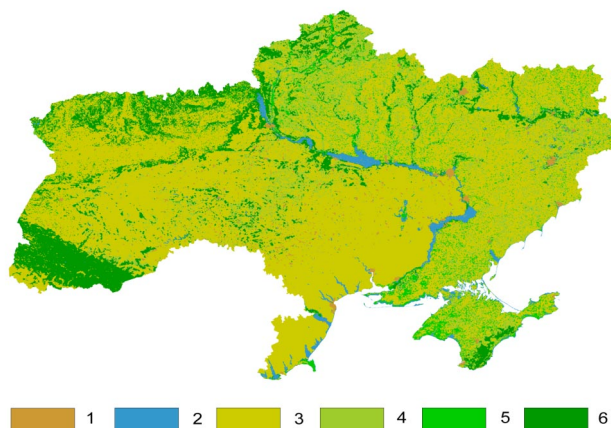


Рис. 2. Типова класифікація земних покриттів території України.
1 — штучні; 2 — водна поверхня; 3 — степ, суха трава; 4 — степ, зелена трава; 5 — сільгоспугіддя; 6 — ліс

Таблиця 1.
Розподіл типових покриттів земної поверхні в межах території України

| Поверхня | σ_i , відносні одиниці | імовірність появи $p(\sigma_i)$ |
|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Водна поверхня | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0.03 |
| Асфальт, бетон | $2 \cdot 10^{-3}$ | 0.04 |
| Степ, суха трава | $7 \cdot 10^{-3}$ | 0.48 |
| Степ, зелена трава | $1.4 \cdot 10^{-2}$ | 0.10 |
| Сільгоспугіддя | $7 \cdot 10^{-2}$ | 0.20 |
| Ліс | $1.4 \cdot 10^{-1}$ | 0.12 |
| Невеликі будівлі | 0.25 | 0.02 |
| Мобільні об'єкти | 0.5 | 0.01 |

ни згідно з типовою класифікацією земних покриттів [11], поданою на рис. 3, складено табл. 1.

Математичне очікування ξ величини питомої відбивної здатності від елемента розрізнення в процесі синтезування апертури [2]

$$x = E[\sigma] = \sum_i p(\sigma_i) \cdot \sigma_i, \quad (5)$$

де σ_i — питома відбивна здатність поверхні i -го типу, $p(\sigma_i)$ — ймовірність появи елемента поверхні i -го типу в каналі нахиленої дальності.

За оцінками, які наведено в табл. 1, можна одержати значення математичного очікування $\xi = 0.045646$.

Нормовані значення S_j накопиченої енергії відбитих сигналів від однаково відбивальних елементів розрізнення каналу нахиленої дальності наведено в табл. 2. Нормування здійснено відносно енергії, що накопичена при прийомі по головному пелюстку.

Знаки плюс та мінус показують, що фаза сигналів, які приймаються пелюстками, відрізняються на 180° .

Математичне очікування помилки виміру енергії відбиття від елемента розрізнення синтезованої ДС за рахунок завад по бокових пелюстках

$$\pm \frac{S_0}{\sum_{j=1}^{20} S_j} = \pm 0.00102 \text{ (0.1\%)}, \quad (6)$$

де S_0 — нормована енергія головної пелюстки,

$\pm \sum_{j=1}^{20} S_j$ — нормоване комплексне сумарне значення енергії бокових пелюсток.

Середнє абсолютне відхилення дорівнює

$$E[|\sigma - \xi|] = \sum_i |\sigma_i - \xi| \cdot p(\sigma_i) = 0.049648. \quad (7)$$

Середнє відносне відхилення внеску завадового

Таблиця 2.
Нормовані значення накопиченої енергії відбитих сигналів по пелюстках

| № пелюстки j | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Нормоване значення енергії S_j | + 1.000000 | - 0.012660 | + 0.016780 | - 0.013540 | + 0.011005 | - 0.009200 | + 0.007880 | - 0.006880 | + 0.006104 | - 0.005480 | + 0.004969 |

сигналу бокових пелюсток від його математичного очікування дорівнює відношенню середнього абсолютного відхилення від очікуваної питомої ефективної поверхні відбиття до очікуваної питомої ефективної поверхні відбиття

$$\frac{E\|\sigma - \xi\|}{\xi} = 0.049648:0.045646 = 1.0876747. \quad (8)$$

З урахуванням відносного середнього абсолютного відхилення внеску завадового сигналу бокових пелюсток від його математичного очікування, величина похибки виміру відбиття від елемента розрізнення знаходиться як

$$\frac{\xi + E\|\sigma - \xi\|}{\xi} \cdot \frac{S_0}{\sum_{j=1}^{20} S_j} = 0.00213. \quad (9)$$

В той же час якість виміру функції відбиття від областей місцевості з локальною неоднорідністю, особливо з невеликими значеннями ЕПР буде більш суттєвим. Прийmemo у якості поверхні, що виділяється з визначеним рівнем якості, поверхню, що має питому ЕПР наступну за мінімальним значенням ЕПР (див. табл. 1), тобто поверхню з $\sigma_i = 2 \cdot 10^{-3}$.

Математичне очікування внеску завадового сигналу Δw від бокових пелюсток будемо визначати як величину, що пропорційна добутку значення очікуваної питомої ефективної поверхні відбиття на сумарну енергію відбиття боковими пелюстками синтезованої ДС $\sigma_i w$:

$$\frac{\Delta w}{w_{\min}} = \frac{\xi}{\sigma_{\min}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{20} S_j}{S_0} = 22.823 \cdot 0.00102 = 0.02328, \quad (10)$$

де Δw — відхилення накопичуваної енергії відбиття, що обумовлено боковими пелюстками синтезованої ДС, w_{\min} — енергія відбиття, що еквівалентна відбиттю від поверхні з мінімальною питомою відбивною здатністю σ_{\min} .

Отже, математичне очікування добавлення в величину мінімально накопичуваної енергії від елемента розрізнення по головному пелюстку складає 2.3 %. А з урахуванням середнього відносного відхилення внеску завадового сигналу бокових пелюсток від його математичного очікування величина похибки від розрізнювального елемента відбиття з ЕПР, що має мінімальне значення $\sigma_{\min} = 2 \cdot 10^{-3}$, дорівнює

$$\frac{\xi + E\|\sigma - \xi\|}{\sigma_{\min}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{20} S_j}{S_0} = 49648 + (0.045646) : 0.00200102 = 0.0486. \quad (11)$$

З урахуванням значень питомої відбивної здатності земної поверхні, значень її математичного очікування та середнього абсолютного відхилення, можна встановити, що імовірність знаходження питомої відбивної здатності земної поверхні в інтервалі від значення математичного очікування плюс середнє абсолютне відхилення до максимальної питомої відбиваючої здатності p ($\sigma = 0.095 \dots 0.5$) = 0.15; при цьому помилка виміру енергії відбиття від елемента розрізнення з мінімальною питомою відбивною здатністю σ_{\min} не перевищує 5 % з імовірністю $p = 0.85$.

Помилка виміру енергії відбиття від елемента розрізнення з питомою відбивною здатністю $\sigma > \sigma_{\min}$ буде суттєво меншою за наведеною вище. Наприклад, наступною за питомою відбивною здатністю згідно табл. 1 буде поверхня з $\sigma = 0.007$. Математичне очікування внеску завадового сигналу від бокових пелюсток в цьому випадку дорівнюватиме

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{\xi}{\sigma} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{20} S_j}{S_0} = 6.52 \cdot 0.00102 = 0.007, \quad (12)$$

тобто математичне очікування добавлення до величини мінімально накопичуваної енергії від елемента розрізнення по головному пелюстку дорівнює 0.7 %. А з урахуванням середнього відносного відхилення внеску завадового сигналу бокових пелюсток від його математичного очікування величина похибки від розрізнювального елемента відбиття з ЕПР, що має значення $\sigma = 7 \cdot 10^{-3}$, дорівнює

$$\frac{\xi + E\|\sigma - \xi\|}{\sigma} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{20} S_j}{S_0} = 0.014 - \quad (13)$$

помилка виміру енергії відбиття від елемента розрізнення в цьому разі не перевищує 1.4 % з імовірністю $p = 0.85$.

Таким чином, враховуючи функцію розподілу амплітуди поля за розкритом синтезованої апертури, яка визначається формою ДС приймально-передатальної антени, усередненням відбитого сигналу по апертурі фізичної антени та впливом сферичності фронту хвилі, оцінку впливу бокових пелюсток на рівень завадового сигналу можна характеризувати наступними величинами:

1. Математичне очікування помилки виміру енергії відбиття від елемента розрізнення синтезованої ДС, що обумовлено завадами по бокових пелюстках, складає ± 0.1 %.

2. Математичне очікування добавлення або зменшення до величини мінімально накопичуваної енергії від елемента розрізнення по головному пелюстку, що вимірюється, не перевищує 2.3 %, а його відносне середнє абсолютне відхилення від цього значення дорівнює 4.8 %.

3. При вимірі енергії відбиття від елементів розрізнення місцевості з питомою відбивною здатністю,

яка відрізняється від мінімально вимірюваної, складова завадового сигналу, що обумовлюється боковими пелюстками, не перевищує 1 %.

4. З імовірністю 0.85 помилка виміру енергії відбиття від елемента розрізнення цілі з мінімальною питомою відбивною здатністю не перевищує 5%.

Наведені розрахунки свідчать, що похибки вимірювання відбиття земної поверхні в РСА, обумовлені боковими пелюстками діаграми спрямованості, в більшості випадків не заважають вирішенню типових задач дистанційного зондування Землі.

Література

1. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук; под. ред. В. С. Вербы. — М.: Радиотехника, 2010. — 680 с.
2. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. — М.: Наука, 1984. — 831 с.
3. Коберниченко В. Г. Особенности формирования изображений в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой / В. Г. Коберниченко // Теория и практика радиолокации земной поверхности. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. — № 19(71). — С. 43—50.
4. Радиолокационные станции воздушной разведки / Под ред. Г. С. Кондратенкова. — М.: Воениздат, 1983. — 152 с.
5. Федотов Б. Н. Факторы, определяющие расширение диаграммы направленности радиолокатора с синтезируемой апертурой, и оценка их совместного влияния на разрешающую способность / Б. Н. Федотов, А. А. Слюсарчук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил, 2011. — № 1(27) — С. 111—115.
6. Федотов Б. Н. Технология увеличения ширины полосы обзора спутниковых радаров сверхвысокого разрешения / Б. Н. Федотов, С. А. Станкевич // Космічна наука і технологія, 2013. — Т. 19. — № 1 — С. 38—43.
7. Dobson M. C. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar / M. C. Dobson, F.T. Ulaby, L.E. Pierce // Remote Sensing of Environment, 1995.— Vol. 51.— No.1.— P. 199–214.
8. Geudtner D. Sentinel-1 system capabilities and applications / D. Geudtner, R. Torres, P. Snoeij, M. Davidson, B. Rommen // Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'14). — Quebec: IEEE, 2014.— P. 1457–1460.
9. Long M. W. Radar Reflectivity of Land and Sea / M. W. Long.— Boston: Artech House, 2001. — 534 p.
10. Oliver C. Understanding Synthetic Aperture Radar Images / C. Oliver, S. Quegan.— Raleigh: SciTech Publishing, 2004. — 512 p.
11. Tsendbazar N.-E. Spatial accuracy assessment and integration of global land cover datasets / N.-E. Tsendbazar, S. de Bruin, S. Fritz, M. Herold // Remote Sensing, 2015.— Vol.7. — No. 12.— P. 15804–15821.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОТРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Л. М. Артюшин, С. А. Станкевич, Б. Н. Федотов

В статье оценена составляющая ошибки измерения энергии отражения от элементов разрешения, обусловленная боковыми лепестками диаграммы направленности в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры. Определена оценка математического ожидания этой ошибки. На основе типовой классификации земных покрытий для территории Украины рассчитано математическое ожидание величины удельной отражающей способности от элемента разрешения земной поверхности в процессе синтезирования апертуры. Статистически оценена точность измерения функции отражения от областей с локальными неоднородностями.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, диаграмма направленности, боковые лепестки, отражающая способность, классификация земных покрытий

ACCURACY ASSESSMENT OF THE LAND SURFACE REFLECTANCE MEASURING IN SYNTHETIC APERTURE RADAR

L. M. Artyushyn, S. A. Stankevich, B. N. Fedotov

The error component of bin reflection energy measuring due to side lobes in synthetic aperture radar is estimated in the paper. The mean expectation of this error was estimated. The mean expectation value of land surface bin reflectivity during aperture synthesizing was calculated using the standard land cover classification for Ukraine territory. The accuracy of reflectance measuring within local non-homogeneities area was evaluated statistically.

Keywords: synthetic aperture radar, directional response pattern, minor lobes, reflectance, land cover classification