

## Розрахунок розрізнявальної здатності системи приймально-передавальних антен в решітках синтезованої апертури надвисокої розрізненості

О. О. Слюсарчук, В. В. Руденко, С. М. Ніколаєв

Науково-дослідний інститут Міністерства оборони України  
Corresponding author. E-mail: SAA2812@ukr.net

Paper received 28.05.20; Accepted for publication 18.06.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-233VIII28-16>

**Анотація.** Задача досягнення розрізнявальної здатності радіолокаційних станцій до рівня, який є достатнім для розпізнавання, є актуальною на теперішній час. Сучасні методи підвищення розрізнявальної здатності забезпечують детальність радіолокаційного зображення, яка може конкурувати із системами видового огляду оптичного діапазону хвиль. В даній статті запропоновано метод побудови системи приймально-передавальних антен решіток синтезованої апертури, який дозволяє зменшити гостроту проблеми недостатнього енергетичного рівня, та провести розрахунки розрізнявальної здатності за шляховою дальністю для  $n$ -опромінювачів.

**Ключові слова:** радіолокація, решітка синтезованої апертури, надвисоке розрізнення, антена.

Радіолокаційні станції (РЛС) огляду Землі, які встановлюються на літаках та космічних літальних апаратах, дозволяють отримувати радіолокаційне зображення земної поверхні та об'єктів, що на ній знаходяться, незалежно від метеорологічних умов та рівня природного освітлення місцевості. При цьому ділянка огляду може знаходитися на великій відстані від носія РЛС і мати значні геометричні розміри. Крім того, сучасні методи підвищення розрізнявальної здатності забезпечують детальність радіолокаційного зображення земної поверхні, яка може конкурувати за якістю із системами видового огляду оптичного діапазону хвиль. Це, в свою чергу, відкрило широкі можливості використання радіолокаційних засобів дистанційного зондування Землі для вирішення завдань картографування місцевості, визначення льодової обстановки, ведення геологічних та екологічних досліджень, складання карт рослинності та снігового покриву, виявлення малорозмірних об'єктів, нафтових плям і таке інше. Це вимагає від сучасних решіток синтезованої апертури (РСА) потребу в дальності дії у декілька десятків кілометрів та надвисоку розрізнявальну здатність.

Проблема отримання надвисокого розрізнення в смуговій РЛС із синтезуванням апертури підвищеної дальності дії в загальному сенсі вимагає подолання обмеження на добуток розрізнявальних координат (сферичності фронту хвилі зондувального сигналу). Класична структура РСА надвисокого розрізнення має обмеження на добуток розрізнявальних координат (критерій Лейта) [1]. Таке достатньо жорстке обмеження по дальності дії складає декілька кілометрів для розрізнявальної здатності, яка дорівнює долі метра.

Сутність обмежень для РЛС з РСА надвисокої розрізненості, тобто при розрізненості за шляховою дальністю ( $\delta x$ ) та нахилоною дальністю ( $\delta r$ ) менше, ніж  $1 \div 3$  м, полягає в тому, що при смуговому режимі огляду розрізнявальна здатність за шляховою дальністю визначається горизонтальним розміром антени РСА. При використанні однієї антени для передавання зондувального сигналу і прийому відбитого сигналу вона дорівнює за різними джерелами інформації від  $0,5d_r$  до  $1,5d_r$  [2 – 6]. Для її підвищення необхідно збільшувати ширину діаграми спрямованості (ДС) в горизонтальній площині. Це, з одного боку, зменшує коефіцієнт спрямованої дії (КСД) станції, а з іншого – збільшує час опромінення цілі. Крім того, при зменшенні розміру елемента розрізнення  $\delta r \times \delta x$  за інших рівних умов зменшується від-

ношення сигнал/шум на вході приймача, що погіршує якість радіолокаційного зображення. Тобто при заданій якості зображення зменшується дальність дії РСА.

Враховуючи те, що при конструюванні РСА розрізнявальну здатність за нахилоною та шляховою дальністю намагаються зробити приблизно однаковими ( $\delta x \approx \delta r$ ), відносно погіршення максимальної дальності дії смугової РСА при підвищенні розрізнявальної здатності визначається співвідношенням

$$\frac{R'}{R} = \frac{d'_r}{d_r} \quad (1)$$

Тобто максимальна дальність дії РСА лінійно зменшується із покращенням лінійної розрізнявальної здатності (рис. 1).

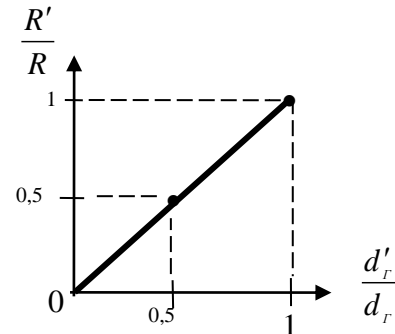


Рис. 1. Залежність відносної дальності дії від відносного розміру антен

Проблема недостатнього енергетичного рівня в РСА надвисокої розрізненості полягає в тому, що для підвищенні розрізнявальної здатності за шляховою дальністю необхідно зменшувати горизонтальний розмір приймально-передавальної антени РСА. Це зменшує енергетичний потенціал станції, а, відповідно, і максимальну дальність дії. Крім того, підвищення розрізнявальної здатності відповідним чином зменшує енергію відбиття від елемента розрізнення, що також викликає зменшення дальності дії при фіксованій якості зображення.

Ідея часткового вирішення проблеми недостатнього енергетичного рівня в РСА надвисокої розрізненості полягає у використанні системи з декількох приймально-передавальних антен з високим коефіцієнтом спрямованої дії  $G_{прд}$  і  $G_{прм}$ , діаграми спрямованості яких при об'єднанні створюють ДС антенної системи РСА, що забезпечує отримання потрібної розрізнявальної здатності за шляховою дальністю. При практичному

конструюванні таких РСА ця ідея потребує детальної розробки та обґрунтування.

По-перше, бажано, щоб антенна система смугової РСА мала максимально допустимий для носія станції розмір.

По-друге, ширина ДС в горизонтальній площині (кут синтезування апертури) забезпечується додаванням окремих ДС, що утворюються антенами, які формуються, наприклад, на базі одного параболічного рефлектора, шляхом розташування в його фокальній площині декількох випромінювачів. Випромінювачі повинні бути розташовані на відстані, що забезпечує перекриття їх ДС, наприклад, на рівні половинної напруженості. Тобто ширина ДС в горизонтальній площині окремої антени в цьому випадку

$$\theta_i = \frac{\lambda \mu}{l_{\text{РГ}} k} \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу зондування;  
 $l_{\text{РГ}}$  – горизонтальний розмір рефлектора;  
 $k$  – коефіцієнт використання поверхні розкриву рефлектора;

$\mu$  – коефіцієнт розширення ДС при відліку на рівні, відмінному від  $0,7U_m$ .

Кут відхилення ДС опромінювача, якій зміщено на відстань  $\Delta x$  від фокуса параболічного рефлектора, дорівнює [8]

$$\alpha = \frac{2\Delta x}{l_{\text{РГ}}} \sin \Psi_0 \quad (3)$$

де  $2\Psi_0$  – кут розкриву антени.

Коефіцієнт використання поверхні розкриву дзеркальних параболічних антен звичайно знаходиться у межах  $0,6 - 0,8$  [8].

Результати експериментальних досліджень свідчать, що при куті відхилення максимуму ДС на  $5^\circ - 10^\circ$  розширення ДС є незначним, як і збільшення рівня бокових

Таблиця 1

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\delta x / \delta x'$	1	2,44	3,88	5,32	6,76	8,30	9,74	11,18

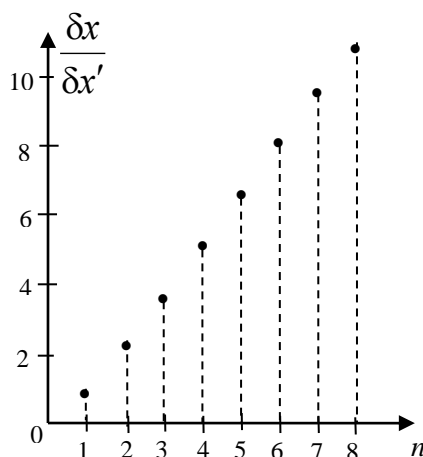


Рис. 2. Ступінь покращення розрізненості від числа опромінювачів

Відмінною особливістю смугової РСА з дзеркальною антеною з декількома опромінювачами є її енергетика, яка значно краща, ніж енергетика антени з одним опромінювачем при класичній структурі побудови смугової РСА.

Визначимо дальність дії смугової РСА, що має антенну систему з декількома опромінювачами. Використавши одну з форм запису дальності дії [7]

пелюсток, та ними можна зневажити. Для формування однопелюсткової ДС шляхом відповідного розташування окремих опромінювачів у фокальній площині рефлектора визначимо відстань між ними  $\Delta x$ . Кут між напрямками максимумів ДС сусідніх опромінювачів повинен дорівнювати ширині ДС на рівні  $0,5$  від максимального значення. Підставляючи замість кута відхилення  $\alpha$  до співвідношення (3) значення ширини ДС з виразу (2), отримуємо

$$\frac{\mu \lambda}{k l_{\text{РГ}}} = \frac{2\Delta x}{l_{\text{РГ}}} \sin \Psi_0 \quad (4)$$

Звідси відстань між опромінювачами

$$\Delta x = \frac{\mu \lambda}{2k \cdot \sin \Psi_0} \quad (5)$$

Для типових значень  $k$  і  $\Psi_0$  відстань між опромінювачами  $\Delta x$  є більшою, ніж розмір хвильоводу. Ширина ДС (кут синтезування) антенної системи з  $n$  опромінювачів визначається як

$$\theta_0 = \beta = (n-1) \frac{\mu \lambda}{k l_{\text{РГ}}} + \frac{\lambda}{k l_{\text{РГ}}} = \frac{\lambda}{k l_{\text{РГ}}} [\mu(n-1) + 1] \quad (6)$$

Потенційна розрізнявальна здатність смугової РСА з такою антенною системою дорівнює

$$\delta x = \frac{\lambda}{2\beta} = \frac{l_{\text{РГ}}}{2[\mu(n-1) + 1]} \quad (7)$$

В залежності від кількості опромінювачів відносно покращення розрізнявальної здатності становить

$$\frac{\delta x}{\delta x'} = \mu(n-1) + 1 = 1,44(n-1) + 1 \quad (8)$$

Значення відносного покращення розрізненості за шляховою дальністю від кількості опромінювачів (за умов перекриття ДС антен на рівні  $0,5U_m$ ) наведено в таблиці 1 та відображено на рис. 2.

$$R \leq \sqrt[3]{\frac{P_{\text{сеп}} \lambda^2 G^2 \theta_0}{64n\pi^3 W \kappa_{\text{уд}} k T \eta}} \sigma_{\text{уд}} \delta x \delta r \quad (9)$$

де  $G$  – коефіцієнт спрямованої дії антени РСА;

$n$  – кількість окремих опромінювачів, перетворимо співвідношення (9) з урахуванням (6) та визначення КСД

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} l_{\text{РВ}} l_{\text{РГ}} \quad (10)$$

при повному використанні поверхні розкриву рефлектора

$$R \leq \sqrt[3]{\frac{P_{\text{сеп}} l_{\text{РВ}}^2 l_{\text{РГ}} [\mu(n-1) + 1]}{4n\pi \lambda W \kappa_{\text{уд}} k T \eta}} \sigma_{\text{уд}} \delta x \delta r \quad (11)$$

Відносно збільшення дальності дії смугової РСА, що має антенну систему з  $n$  опромінювачами, дорівнює

$$\frac{R'}{R} = \sqrt[3]{[\mu(n-1) + 1] \frac{l_{\text{РГ}}'}{n l_{\text{РГ}}}} \quad (12)$$

де  $n = 2, 3, 4, \dots$

При однаковій розрізненості за шляховою дальністю

$$\frac{l_{\text{РГ}}'}{l_{\text{РГ}}} = [\mu(n-1) + 1] \quad (13)$$

Тобто

$$\frac{R'}{R} = \sqrt[3]{[\mu(n-1)+1]^2 \cdot n^{-1}} \quad (14)$$

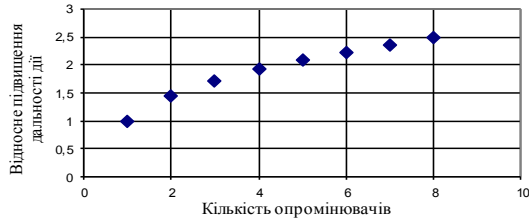


Рис. 3. Ефективність використання в РСА надвисокої розрізності антенної системи з декількома опромінювачами

Таблиця 2

n	1	2	3	4	5	6	7	8
R'/R	1	1,44	1,71	1,92	2,09	2,24	2,37	2,49

$$R \leq \sqrt[3]{\frac{P_{сеп} I_{РВ}^2 I_{РГ} \sigma_{уд} [\mu(n-1)+1]}{4n\pi\lambda W_{кш} k T \eta}} \cdot \frac{l_{РГ}}{2[\mu(n-1)+1]} \delta r = \sqrt[3]{\frac{P_{сеп} I_{РВ}^2 I_{РГ}^2 \sigma_{уд}}{8n\pi\lambda W_{кш} k T \eta}} \delta r \quad (15)$$

Співвідношення (15) дозволяє зробити висновок, що використання дзеркальної антени, яка має n опромінювачів, розміщених у рядок в фокальній площині рефлектора, дозволяє покращити розрізнювальну здатність за шляховою дальністю в  $\mu(n-1)+1$  разів, при цьому дальність дії зменшується в  $\sqrt[3]{\frac{1}{n}}$  рази.

Наприклад, для отримання розрізнювальної здатності 0,3 м в смуговій РСА може використовуватись дзеркальна параболічна антена з одним опромінювачем і з горизонтальним розміром  $d_r = 0,6$  м (РСА “Lynx”) [9]. При збільшенні горизонтального розміру рефлектора антени до 3,2 м та при застосуванні 4-х опромінювачів, що розташовані в рядок у фокальній площині, дальність дії буде збільшено у два рази.

Таким чином, запропоновано метод побудови РСА,

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Перминов А.В., Файзрахманова И.С. Прикладная голография. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2017. – 89 с.
2. Costa, M.M.S. Basic Requirements for Synthetic Aperture Radar / Costa, M.M.S. Bogossian, O.L., Passaro, A. // 6th Workshop on Space Engineering and Technology, At National Institute for Space Research, São José dos Campos, SP, Brasil. August 2015.
3. Ashwini R. Design of digital FIR filter for radar application/ Ashwini R, Venkataratnam Ponnuru // International journal of innovative research in science, engineering and technology. Vol. 6, Issue 9, September 2017.
4. Xinhua Mao, Ultra-high resolution (0.05m) SAR image formation processing/ Xinhua Mao, Xueli He, Lan Ding, Danqi Li, He Yan. // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation

Значення відносного збільшення дальності дії при перекритті ДС в горизонтальній площині на рівні 0,5 від максимального значення ( $\mu=1,44$ ) наведено в таблиці 2 та зображено на діаграмі (рис. 3).

Для визначення впливу розглянутої антенної системи на дальність дії смугової РСА при збільшенні розрізнювальної здатності перетворимо співвідношення (9) з урахуванням (7)

який дозволяє зменшити гостроту недостатнього енергетичного рівня та покращити енергетичний потенціал РСА надвисокої розрізненості. Пропонується будувати антенну систему на базі одного дзеркального параболічного рефлектора, в фокальній площині якого розміщуються горизонтально декілька окремих антенних опромінювачів. Прийняті сигнали кожним окремим опромінювачем когерентно підсумуються та подаються на вхід приймача як сигнали однопелюсткової антени. Така побудова антенної системи дозволяє подолати теоретичну межу розрізнювальної здатності за шляховою дальністю, що дорівнює  $0,5d_r$ , та суттєво підвищити дальності дії за рахунок ускладнення антени та її фідерного тракту.

- tion (ISAP). October 2017.
5. Реутов А. П., Михайлов Б. А., Кондратенков Г. С., Бойко Б. В. Радиолокационные станции бокового обзора. – М.: Сов. радио, 1970. – 298 с.
6. Справочник по радиолокации /под ред. М. Скольника.– Том. 2. Радиолокационные антенные устройства // Пер. под ред. П. И. Дудника. – М.: Сов. радио, 1977. – 408 с.
7. Сафронов Г.С. Введение в радиоголографию./ Г.С. Сафронов, А.П. Сафронова – М.: Сов. радио, 1973. – 169 с.
8. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.
9. S. I. Tsunoda, F. Pace, J. Stence, M. Woodring Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar / Sandia National Laboratories // SPIE Aerosense. Vol. 3704, 1999.

#### REFERENCES

1. Perminov A.V., Faizrakhmanova I.S. Applied holography. - Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2017. - 89 p.
5. Reutov A.P., Mikhailov B.A., Kondratenkov G.S., Boyko B.V. Radar stations of lateral review. - M.: Sov. radio, 1970. - 298 p.
6. Handbook of radar / ed. M. Skolnik.– Vol. 2. Radar antenna

- devices // Per. under ed. P.I. Dudnik. - M.: Sov. radio, 1977. - 408 p.
7. Safronov G.S. Introduction to radio holography./ G.S. Safronov, A.P. Safronova - M.: Sov. radio, 1973. - 169 p.
8. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. Antenna-feeder devices. M.: Sov. radio, 1974. - 536 p.

#### Calculation of the resolution of the receiving and transmitting antenna system in lattices of the synthesized aperture of ultrahigh resolution

O. O. Slyusarchuk, V. V. Rudenko, S. M. Nikolaev

**Abstract.** The task of achieving the resolution of radar stations to a level sufficient for recognition is relevant today. Modern methods of increasing the resolution provide detail of the radar image, which can compete with the systems of species inspection of the optical wavelength range. This article proposes a method of constructing a system for receiving and transmitting antennas lattices of the synthesized aperture, which allows to reduce the severity of the problem insufficient energy level, and calculate of the resolution over the distance for n-irradiators.

**Keywords:** radar, lattice of synthesized aperture, ultrahigh resolution, antenna.