УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2024.02.055

О. Л. ВОЛОШЕНЮК[1], О. О. ПИРОЖЕНКО[2]

ВИМОГИ ДО ВИБОРУ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ РАДАРІВ ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ НА БАЗІ МАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

[1] Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail:oksana.volosheniuk@gmail.com;
[2] ТОВ "Атлас Індастрі",
пр. Олександра Поля, 72, 49054, Дніпро, Україна

Сучасні малі космічні апарати (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) знайшли широке практичне застосування для вирішення різних завдань соціально-економічної та оборонної сфер. Застосування малих КА виправдано як в якості основи для формування великих угруповань, так і угруповань з декількома КА або одиночних КА з метою зниження собівартості космічної інформації ДЗЗ. Мініатюризація електронних компонентів та останні технологічні досягнення зробили радіолокаційні системи сумісними з малими КА. Мета роботи – на базі малих КА представити вирази для обчислення важливих параметрів радіолокаційних систем, їх аналіз, розрахунки можливих значень розглянутих параметрів. Розглянуто принципові можливості використання радарів із синтезованою апертурою (РСА). Опрацьовано інтернет-джерела, що надають широкий спектр інформації про сучасні тенденції, технології та використання КА із РСА. Особливу увагу приділено розвитку міні- та мікро- КА з РСА X-діапазону, що працюють, зокрема, в маршрутному й прожекторному режимах зйомки. Представлено ключові параметри, що впливають на можливість РСА формувати зображення високої якості. На прикладі угруповання ICEYE, на базі малих КА наведено важливі технічні характеристики та параметри сучасних радіолокаційних систем, оснащених активною фазованою антенною решіткою. Розглянуто модель зйомки КА з РСА в маршрутному режимі. В наближенні прямокутної апертури антени наведено вирази для оцінки роздільної здатності за похилою і горизонтальною дальністю та оцінки роздільної здатності в азимутальному напрямку. Дано оцінки доступного діапазону значень частоти повторення імпульсів РСА для малих КА. Представлено залежності між максимальною шириною смуги огляду і мінімальним значенням частоти повторення імпульсів РСА. Наведено вирази для оцінки розмірів антени, чутливості РСА, відношення сигнал/шум. Представлені вирази дозволяють провести аналіз впливу основних технічних характеристик і параметрів космічних РСА, що використовують мінісупутникові платформи, на конструктивні, енергетичні характеристики КА і параметри орбіт. Отримані результати дають можливість виробити рекомендації щодо розробки знімальної апаратури вітчизняних низькоорбітальних КА та їх угруповань.

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі, малий космічний апарат, маршрутний режим зйомки, радар із синтезованою апертурою, роздільна здатність, частота повторення імпульсів, відношення сигнал/шум.*

Present-day small satellites for Earth remote sensing have found wide practical application in solving different problems in the socio-economic and defense areas. The use of small satellites is justified as a basis for the formation both of large constellations and constellations of several spacecraft or single spacecraft with the aim to reduce the cost of Earth remote sensing information. The miniaturization of electron components and the latest technological advances have made radar systems compatible with small satellites. The goal of this paper is to present, based on small satellites, expressions for calculating the key parameters of radar systems and their analysis and to calculate possible values of the parameters considered. Possibilities in principle of using synthetic aperture radars (SARs) are considered. The paper presents an overview of Internet sources that give broad information on the recent trends, technologies, and use SAR-equipped satellites. Particular attention is paid to the development of mini- and microspacecraft with X-band SARs operating, in particular, in the stripmap and spotlight modes. The key parameters that have an effect on the SAR possibility of producing high-quality images are presented. By the example of the ICEYE constellation of small satellites, important technical characteristics and parameters of modern radar systems equipped with an active phased array antenna are presented. A model of SAR imaging in the stripmap mode is considered. In the approximation of a rectangular antenna aperture, expressions are given to estimate the slant and the horizontal range resolution and the azimuthal resolution. The available range of the small-satellite SAR pulse repetition frequency is estimated. Relationships between the maximum swath width and the minimum SAR pulse repetition frequency are presented. Expressions are given to estimate the antenna dimensions, the SAR sensitivity, and the signal-to-noise ratio. The presented expressions allow one to analyze the effect of the main technical characteristics and parameters of minisatellite SARs on the design and power characteristics of small satellites and the orbit parameters. The obtained results make it possible to develop recommendations on the design of imaging equipment for home low-orbit satellites and their constellations.

Keywords: *Earth remote sensing, small satellite, stripmap mode imagery, synthetic aperture radar, resolution, pulse repetition frequency, signal-to-noise ratio.*

Вступ. Однією з основних тенденцій розвитку низькоорбітальних угруповань космічних апаратів (КА) останнього десятиліття є активна розробка, запуск та експлуатація мікро- (до 100 кг) та міні- (100–500) кг КА дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1], [2]. В більшості випадків апарати такого класу проводять оптичну або радарну зйомку. Також відзначається перспективність розвитку теплової інфрачервоної та гіперспектральної оптичної зйомки [3]. На протязі останніх 5 – 7 років спостерігається значне зростання інтересу приватних компаній до створення малих КА та їх угруповань з використанням радарів із синтезованою апертурою (РСА або SAR – Synthetic Aperture Radar в англійському варіанті) [4]–[9]. В порівнянні з оптичними, малі радарні КА відрізняються більш жорсткими технічними вимогами й обмеженнями до РСА, але такі КА мають ряд переваг і можливостей.

Висока роздільна здатність: на низьких навколоземних орбітах (ННО) КА з РСА при мінімальних впливах метеорологічних умов і часу доби можуть забезпечувати високу просторову роздільну здатність при зйомці;

Швидкість оновлення даних ДЗЗ: малі КА на ННО мають можливість частіше оновлювати дані, які корисні для побудови аналітики поточних змін і швидкого реагування на надзвичайні події та кризові ситуації, оцінки їх наслідків.

Низькі витрати і гнучкість: завдяки останнім технологічним досягненням і мініатюризації компонентів РСА, малі КА зазвичай більш доступні за ціною, ніж традиційні КА, і можуть бути спроєктовані та виготовлені в більш стислі строки при мінімальних витратах, що дає змогу створювати гнучкі системи спостереження і моніторингу;

Широкий спектр застосування на ринку ДЗЗ: радари на малих КА можуть використовуватись для вирішення різних завдань, зокрема спостереження за змінами рельєфа місцевості, оборони й розвідки, контроля за природними лихами або безпекою, аналізу стану ґрунту й врожайності в землеробстві тощо.

Ефективність застосування малих радарних КА за цільовим призначенням багато в чому визначається можливостями РСА. Тому одним з основних завдань при проєктуванні таких КА є забезпечення максимальної продуктивності в залежності від конструкційних характеристик КА і параметрів РСА.

Мета даної роботи – на базі малих КА представити вирази для обчислення важливих параметрів РСА, їх аналіз, розрахунки можливих значень розглянутих параметрів.

Принцип дії РСА. Основним принципом дії радара є взаємодія сигналу з ціллю – радар освітлює сцену імпульсами мікрохвильового випромінювання, ці імпульси відбиваються від освітленої сцени, збираються та обробляються приймачем. Радар використовує електромагнітні хвилі для визначення відстані, розміру, швидкості, напрямку та інших характеристик об’єктів спостереження. Апертура антени – це область, через яку радіолокаційний сигнал передається або приймається, в КА апертура представлена ефективною площею антени. Ідея методу отримання високої роздільної здатності при малих розмірах КА й антени відповідно, заснована на формуванні великої апертури антени штучним способом. Для цього апертура синтезується, тобто формується послідовно у часі при русі КА по заданій траєкторії шляхом запам’ятовування відбитого від об’єкта електромагнітного поля – амплітуди й фази радіолокаційного сигналу. Іншими словами, радар із синтезованою апертурою – це бортова когерентна радіолокаційна система бокового огляду, що дозволяє обробляти когерентні вимірювання фазового й доплерівського зсуву по всій ширині променя радіочастотної системи, щоб синтезувати віртуальну апертуру з розміром, еквівалентним відстані, на яку переміщується реальна антена, поки сцена залишається освітленою [10], [11]. Геометрію формування віртуальної апертури антени представлено на рис. 1, де V – швидкість КА, X – проєкція траєкторії руху КА на поверхню Землі (траса польоту), H – висота орбіти КА, L_S – довжина синтезованої апертури або відстань, що проходить КА за час освітлення сцени, R – похила дальність, ДСА – діаграма спрямованості реальної антени, θ_A – ширина променя по азимуту за час синтезування $T_S = t_2 - t_1$ (кутовий розмір діаграми спрямованості), W_g – наземна смуга огляду.

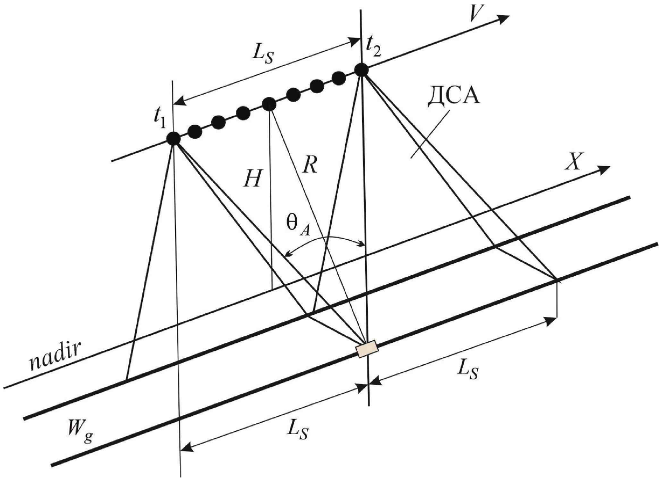

Рис. 1 – Формування віртуальної апертури антени при боковому огляді РСА [10]

Синтезування апертури антени дає змогу значно підвищити роздільну здатність в напрямку руху КА (азимутальному напрямку) й отримати детальне зображення радіолокаційної карти місцевості. Відповідна просторова роздільна здатність у напрямку руху КА наближається до роздільної здатності, досяжної для систем видимого та інфрачервоного випромінювання.

До важливих параметрів РСА можна віднести:

– просторову роздільну здатність (здатність розрізняти найменші об’єкти спостереження і відстані один від одного);

– радіометричну роздільну здатність (здатність сенсора розрізняти об’єкти однієї частини електромагнітного спектру), виражається в кількості біт на піксель зображення;

– частоту повторення імпульсів (кількість імпульсів, що передається та приймається радаром за одиницю часу, від якої залежить швидкість спостереження та чутливість до рухомих об’єктів);

– тривалість імпульсу (час, протягом якого відбувається радіолокаційне випромінювання);

– ширину смуги пропускання (діапазон частот, що використовується для передачі та прийому радіосигналів – чим ширша смуга пропускання, тим краща роздільна здатність);

– розміри антени (впливають на роздільну здатність та характеристики формування зображень);

– режими роботи (РСА може мати різні режими роботи, такі як прожекторний «Spotlight», маршрутний «Stripmap», сканування «ScanSAR» та інші, кожен з яких має свої характеристики й призначення);

– кути огляду (кути, під якими проводиться спостереження за об’єктами, вони можуть змінюватися залежно від конкретного режиму роботи);

– чутливість РСА (характеристика, яка вказує на здатність радара виявляти слабкі цілі та можливість збирати дані при низьких рівнях відношення сигнал/шум);

– відношення сигнал/шум (відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму).

Представлені параметри впливають на можливість РСА формувати зображення високої якості. Для прикладу, в табл. 1, 2 наведено ключові дані РСА, їх значення для КА 2-го покоління угруповання ICEYE [5].

Табл. 1 – Системні й орбітальні параметри датчиків для КА ICEYE 2-го покоління

Параметри	Значення
Розміри антени, м	3,2×0,4
Бажана ефективність антени, %	> 50
Несуча частота, ГГц	9,65
Частота повторення імпульсів, кГц	2–7
Напрямок перегляду	як вліво, так і вправо
Ширина спектра сигналу, МГц	37,6–299
Пікова випромінювана потужність, кВт	3,2
Поляризація	VV
Кут візування (відхилення від надиру), град	15–35 (залежно від режиму)
Маса КА, кг	92
Висота орбіти, км	560–580
Зв’язок (радіолокаційні дані корисного навантаження по низхідній лінії)	X-діапазон (довжина хвилі $\lambda = 3{,}14$ см), 140 Мбіт/с

Табл. 2 – Характеристики радарної зйомки для КА ICEYE 2-го покоління

Параметри	Значення	
	Режим смуги	Режим прожектора
Роздільна здатність, м	3	1
Роздільна здатність за похилою дальністю (slant range resolution), м	0,5 (300 МГц) 1,5 (100 МГц)	0,5 (300 МГц)
Роздільна здатність в азимутальному напрямку (azimuth resolution), м	2,5–3	0,2–1
Ширина смуги огляду, км	30	5
Номінальна довжина ділянки зйомки (азимутальний напрямок), км	50	5
Номінальна тривалість зйомки, с	10	10
Максимальна тривалість зйомки, с	35–75	В/Д
Кут візування (відхилення від надиру), град	15–35	20–35
Коефіцієнт неоднозначності по азимуту, дБ	-17	-17
Коефіцієнт неоднозначності по дальності, дБ	< -20	< -20
Робочий цикл, %	25	
Коефіцієнт шуму системи, дБ	2,6	
Втрати системи, дБ	0,55	
Передискретизація по азимуту	1,33	
Середнє значення NESZ, дБ	-21,5 до -20	-18 до -15
Відношення середньої неоднозначності до сигналу, дБ	< -17,5	
NESZ – Noise equivalent sigma zero або еквівалентний рівень шуму нульового значення, В/Д – відсутність даних		

Датчики ICEYE є радарами X-діапазону, кожен з яких оснащений активною фазованою антенною решіткою та блоком керування електронним променем (electronic beam steering). Орбітальна маневреність КА такого класу та керування його орієнтацією дозволяють швидко й точно спрямовувати радіолокаційні імпульси на Землю. Параметри радарів представлено для двох режимів огляду: режиму смуги та режиму прожектора.

Модель зйомки. Розглянемо модель зйомки поверхні Землі для плоскої підстилаючої поверхні, рис. 2. КА рухається по орбіті висотою H з постійною орбітальною швидкістю V. Розміри реальної антени – L_A, W_A, довжина та ширина антени відповідно. Режим зйомки – бічний огляд, W_g – ширина смуги огляду, R_n, R_f – похила дальність до ближнього та дальнього краю смуги відповідно. Візування спостережуваної ділянки місцевості здійснюється під кутом γ. Для космічних РСА на малих КА значення кута γ знаходиться в межах (15º, 45º), ці значення обумовлені тим, що при малих значеннях γ погіршується роздільна здатність за горизонтальною дальністю (дальністю до відбиваючого елемента на поверхні Землі, напрямок по осі OY) і зростає рівень сигналу фону, а при великих значеннях γ зменшується діапазон однозначного вимірювання дальності та погіршується відношення сигнал/шум. Кут падіння ψ електромагнітної хвилі на задану ділянку (кут місця) й похила дальність R залежать від значень H і γ [12], [13]. У маршрутному режимі діаграма спрямованості антени постійно направлена перпендикулярно вектору швидкості руху КА по орбіті. Розмір сцени в напрямку азимутальної дальності визначається часом увімкнення і вимкнення локатора. Номінальна тривалість спостереження РСА за одне включення становить близько 10 секунд, максимальна – (35–75) секунд, період руху КА по орбіті ~ 96 хвилин [14].

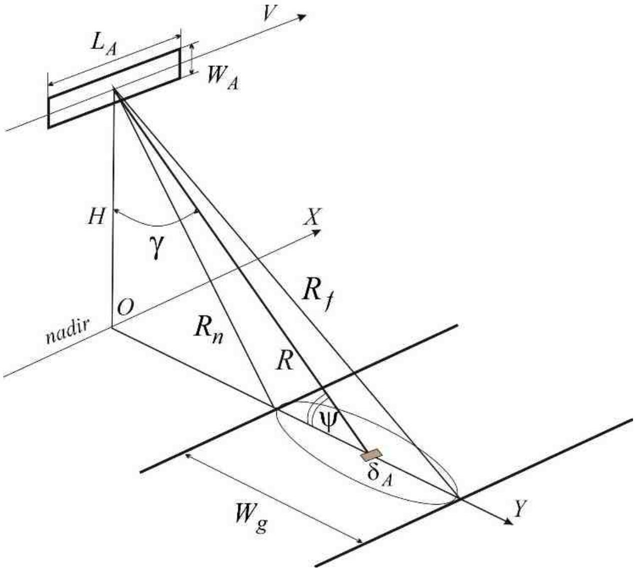

Рис. 2 – Модель зйомки поверхні Землі

Роздільна здатність. Важливою характеристикою РСА є роздільна здатність, яка визначається розмірами (δ_A, δ_W) роздільної ділянки місцевості (рис. 2, 3). Водночас, при проєктуванні малих КА з РСА мінімізація розмірів антени та кількості режимів спостереження має пріоритет над покращенням наземної роздільної здатності, така тенденція спостерігається для КА зі стартовою масою, меншою за 200 кг [15].

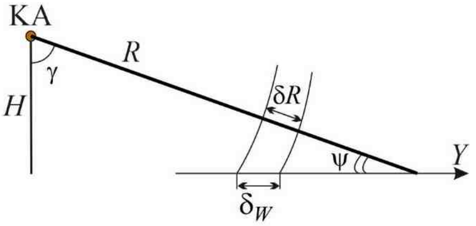

Рис. 3 – Геометрія огляду в проєкції на кутомісну площину

Роздільна здатність в азимутальному напрямку δ_A визначається довжиною синтезованої апертури, еквівалентної довжині траси, протягом якої радар приймає ехо-сигнали від об’єкта спостереження (рис. 1). Ширина променя прямокутної антени довжиною L_A може бути апроксимована кутом $\theta_A = \lambda / L_A$ (для КА класу 100 кг $\theta_A = \frac{0{,}0314}{3{,}2} \approx 0{,}01$ рад). Із рис. 1 видно, що відповідна довжина синтезованої апертури антени дорівнює $L_S = \theta_A R = \frac{\lambda}{L_A} R$. Збільшення довжини L_S призводить до звуження віртуальної ширини променя $\theta_S = \lambda / 2L_S$ і до високої роздільної здатності в азимутальному напрямку

$$\delta_A = \theta_S R = \frac{\lambda}{2L_S} R. \qquad (1)$$

Якщо об’єкт спостереження залишається нерухомим під час руху КА над ним, радар може синтезувати апертуру, величина якої дорівнює $2L_S$ (рис. 1), що призводить до значного покращення роздільної здатності δ_A. Пояснення такого ефекту полягає в тому, що чим менша довжина антени L_A, тим ширше її ДСА, а значить і більша довжина синтезованої апертури L_S (об’єкт довше перебуває в промені ДСА). Значить сумарна енергія сигналів, прийнятих від об’єкта спостереження, зростає. Це еквівалентно збільшенню коефіцієнта підсилення (звуженню ширини ДСА) антени, що в кінцевому результаті призводить до покращення δ_A.

Тоді, підставляючи вираз для L_S в (1), отримаємо, що у маршрутному режимі найбільше значення δ_A обмежене довжиною реальної антени

$$\delta_A \geq \frac{L_A}{2}. \qquad (2)$$

З (2) видно, що δ_A не залежить від відстані між об’єктом спостереження і радаром, а визначається довжиною реальної антени. Зменшення довжини антени покращує азимутальну роздільну здатність, але зменшення L_A має певні межі.

Номінальне значення роздільної здатності за похилою дальністю δR (рис. 3) визначається тривалістю стислого імпульсу τ_{com}, обернено пропорційного ширині спектра зондувального сигналу $\beta = 2V\theta_A / \lambda$ ($\tau_{com} = 1/\beta$)

$$\delta R = \frac{c\tau_{com}}{2} = \frac{c}{2\beta},$$

де c – швидкість світла.

Максимальне значення роздільної здатності за похилою дальністю залежить від ширини смуги зондувального сигналу β, і зазвичай, обмежується швидкістю передачі даних з КА на Землю. Вибір ширини смуги β для космічного РСА обмежений міжнародним "Регламентом радіозв'язку", згідно з яким для X-діапазону максимальна ширина спектра сигналу дорівнює 600 МГц. Це забезпечує потенційну роздільну здатність за похилою дальністю $\delta R = 0{,}25$ м. У цьому разі ефективна тривалість імпульсу має бути не більшою за $\tau_{com} = \frac{2\cdot\delta R}{c} \approx \frac{1}{6}\cdot 10^{-8}$ с. У випадку КА угруповання ICEYE (табл. 1, 2) тривалість імпульсу не більше $\tau_{com} \approx \frac{1}{3}\cdot 10^{-8}$ с.

Не менш важливою характеристикою є горизонтальна дальність δ_W, що визначається перерахунком похилої дальності в горизонтальну через кут падіння ψ або, у випадку плоскої підстилаючої поверхні Землі (рис. 3), через кут візування γ

$$\delta_W = \frac{\delta R}{\cos\psi} = \frac{\delta R}{\sin\gamma} = \frac{c}{2\beta\sin\gamma}. \quad (3)$$

З (3) видно, що значення δ_W не залежить від висоти КА і може бути покращене збільшенням ширини смуги імпульсу β, що випромінюється радаром.

На практиці розмір пікселя (δ_A, δ_W) роблять однаковим по азимуту й горизонтальній дальності.

Частота повторення імпульсів, ширина смуги огляду. Частота повторення імпульсів – F_p (в англійському варіанті PRF – Pulse repetition frequency) є одним із основних параметрів для космічного РСА. F_p визначає швидкість, з якою радар випромінює імпульси радіосигналу, тобто це певна кількість імпульсів, що випромінюються радаром за одиницю часу, зазвичай вимірюється у герцах (Гц). Оптимальне значення F_p залежить від таких параметрів, як роздільна здатність, дальність виявлення цілі та рівень перешкод. З іншого боку, на величину F_p впливають такі параметри, як тривалість імпульсу передавача, ширина смуги огляду, довжина антени, висота орбіти і кут падіння. Внаслідок обмежень F_p, деякі комбінації довжини антени і ширини смуги огляду можуть бути несумісними, оскільки обмеження неоднозначності можуть суперечити вимогам Найквіста щодо частоти повторення імпульсів [16].

Щоб задовільнити вимогам Найквіста, система РСА повинна передати хоча б один імпульс для кожної відстані $L_A/2$, тому мінімальне значення частоти повторення імпульсів становить

$$F_{p,\min} = 2\frac{V}{L_A}. \quad (4)$$

Як було показано вище (2), розрахункове значення δ_A визначається довжиною реальної антени L_A. Але для покращення значення δ_A неможливо нескінченно зменшувати L_A. Зменшення L_A призводить до збільшення $F_{p,\min}$, тобто можливе перекриття ехо-сигналів, відбитих від ближньої і дальньої меж похилої дальності.

Відповідно до (3) та з врахуванням умови (4), між максимальною шириною смуги огляду і мінімальним значенням F_p в РСА буде наступна залежність

$$W_{g,\max} = \frac{c}{2F_{p,\min} \cdot \sin\gamma} = \frac{cL_A}{4V\sin\gamma}. \tag{5}$$

У деяких випадках для малих КА з РСА немає необхідності одночасно досягати максимальної ширини смуги огляду і найкращої роздільної здатності. Виходячи з (2) і (5), наступний вираз представляє обмеження між азимутальною роздільною здатністю і шириною смуги огляду. Швидкість платформи є єдиним параметром, що впливає на роздільну здатність за азимутальним напрямком

$$\frac{W_g}{\delta_A} = \frac{c}{2V\sin\gamma}.$$

Відповідно верхньою межею F_p є ширина смуги огляду

$$F_{p,\max} = \frac{c}{2W_g}. \tag{6}$$

Отже, з виразів (4) і (6) доступний діапазон значень F_p наступний

$$2\frac{V}{L_A} < F_p < \frac{c}{2W_g}.$$

Таким чином, для покращення роздільної здатності в азимутальному напрямку довжина антени має вирішальне значення, і тому радар має подавати імпульси з високою швидкістю, відповідно до вказаних меж F_p.

Розміри антени. Розміри антени є однією з важливих конструкційних характеристик КА, що впливають на продуктивність РСА. Відповідно до (4) довжина антени L_A має задовольняти умові

$$L_A > 2\frac{V}{F_p}. \tag{7}$$

Для запобігання перекриття ехо-сигналів за дальністю (накладення сигналів, відбитих від різних смуг W_g) завдання антени – мінімізувати або подавляти ці єхо-сигнали у межах ДСА, щоб покращити якість прийому та точність визначення місця знаходження об’єкта спостереження. Це означає, що ширина максимальної смуги огляду $W_{g,\max}$ (5) повинна бути більшою за розмір сліду антени на поверхні Землі, тобто $W_{g,\max} > S_{A\_earth}$, де

$$S_{A\_earth} = \theta_A R = \frac{\lambda R}{W_A} < W_{g\max}. \quad (8)$$

Тоді з (8) ширина антени повинна задовольняти умові

$$W_A > \frac{\lambda R}{W_g} = 2\frac{\lambda R F_p}{c}\sin\gamma. \quad (9)$$

З рівнянь (7) і (9) мінімальна площа антени, що задовольняє вказаним обмеженням, становить

$$S_A = W_A \cdot L_A = 4\frac{\lambda R V}{c}\sin\gamma.$$

Для оптимізації продуктивності РСА доцільніше використовувати антену меншого розміру для отримання компактної конструкції, що знижує її вартість. Аналіз відомих робіт [17], [18] та приклад табл. 1 показують, що значення L_A і W_A для малих КА (класу 100 кг) жорстко обмежені й більшість конструкцій антен РСА виявляються досить довгими в азимутальному напрямку (до 5 м) і короткими в поперечному напрямку (до 0,8 м). Розмір антени впливає також на коефіцієнт підсилення і на відношення сигнал/шум.

Чутливість РСА, відношення сигнал/шум. Радіометрична чутливість і радіометрична роздільна здатність відносяться до основних даних, які використовуються для розрахунку проєктних параметрів апаратури РСА [12]. Чутливість РСА використовується як показник якості зображення РСА. Показник відношення сигнал/шум (в англійському варіанті Signal-to-Noise Ratio, *SNR*) важливий для забезпечення ефективності та надійності роботи РСА.

В реальних умовах заздалегідь неможливо або складно знати точну фазу ехо-сигналу спостережуваного об’єкта, тому максимально досяжне значення відношення сигнал/шум Q визначається як відношення потужності сигналу, прийнятого від цілі до рівня шуму в системі [10]

$$Q = \frac{P_{R_{avr}}}{kT_0F_n}T_S, \quad P_{R_{avr}} = \frac{P_{T_{avr}}G^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3R^4L}T_S, \quad (10)$$

де $P_{R_{avr}} \cdot T_S$ – накопичена енергія, що визначається через $P_{R_{avr}}$ – середнє значення накопиченої потужності за час синтезування апертури T_S, $T_S = L_S/V$; F_n – коефіцієнт шуму; k – постійна Больцмана, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – абсолютна температура приймальної системи, $T_0 = 290^0 K$; $P_{T_{avr}}$ – середнє значення потужності випромінювання; $G = \frac{4\pi\eta S_A}{\lambda^2}$ – коефіцієнт підсилення антени, який залежить від площі реальної антени S_A та коефіцієнта використання антени η (як правило, для малих КА η = 0,75, що відповідає значенню азимутальної передискретизації 1,33 (табл. 2), тобто смуга пропускання за азимутом більша за смугу пропускання Доплера); σ – радіометрична чутливість (ефективна поверхня розсіювання шумового еквівалента); L – сумарні втрати в каналі поширення сигналу.

У маршрутному режимі зйомки час синтезування апертури

$$T_S = \frac{\lambda R}{2V\delta_A}.$$

З урахуванням отриманих виразів для G, T_S вираз (10) матиме вигляд

$$Q = \frac{P_{T_{avr}} S_A^2 \eta^2 \sigma}{8\pi R^3 N_0 \lambda L V \delta_A}, \qquad (11)$$

де $N_0 = k_0 T_0 F_n$ – спектральна щільність потужності внутрішнього шуму приймача.

Радіометрична чутливість спостережуваної ділянки (у випадку плоскої поверхні) [10], [11] визначається як

$$\sigma = \sigma^0 \delta_A \delta_W, \qquad (12)$$

де σ^0 – питома радіометрична чутливість спостережуваної ділянки місцевості (σ на одиницю площі).

Тоді, після підстановки (12) у вираз для Q, отримаємо

$$Q = \frac{P_{T_{avr}} S_A^2 \eta^2 \sigma^0 \delta_W}{8\pi R^3 N_0 \lambda L V}.$$

Зручно розглядати такий параметр, як шумовий еквівалент σ^0 – σ_{ne}^0 (noise-equivalent sigma-zero), що характеризує вплив шумів приймача і визначається значенням мінімальної σ^0 фону місцевості, що створює на виході синтезованого зображення потужність, яка дорівнює потужності шумів приймача, тобто для $Q = 1$ [10], [11], [17].

$$\sigma_{ne}^0 = \frac{8\pi R^3 \lambda N_0 L V}{P_{T_{avr}} S_A^2 \eta^2 \delta_W}. \qquad (13)$$

Вираз для середньої потужності випромінювання $P_{T_{avr}}$ можна представити у вигляді

$$P_{T_{avr}} = P_p \tau_p F_p,$$

де P_p – імпульсна потужність випромінювання; τ_p – тривалість імпульсу.

З отриманих залежностей, а також безпосередньо з виразу (13) очевидно, що підвищення роздільної здатності РСА і зменшення потужності зондувального сигналу призводять до пропорційного погіршення чутливості системи. Підвищення висоти орбіти КА також призводить до погіршення значення σ_{ne}^0 за рахунок зниження орбітальної швидкості КА, але така залежність не буде лінійною.

Таким чином, отримані залежності дозволяють провести аналіз впливу основних технічних характеристик і параметрів космічних РСА, що використовують мінісупутникові платформи в маршрутному режимі зйомки на конструктивні, енергетичні характеристики КА й параметри орбіти.

Висновки. Космічні РСА є сучасною технологією радіолокації, яка використовує комплексні алгоритми обробки сигналів для виявлення та класифікації об’єктів спостереження на поверхні Землі або в повітрі (характеристики об’єкта, такі як розмір, форма, структура поверхні й навіть щільність).

Зростаюча потреба у створенні міні- та мікро- КА, що несуть радіолокаційні прилади із синтезованою апертурою нового покоління обумовлена прагненням отримати прийнятні за вартістю КА та їх угруповання на низьких навколоземних орбітах, які забезпечать досить високу періодичність спостереження і можливість зйомки незалежно від погодних умов і часу доби. Представлені характеристики КА вказують на те, що на даний час відзначається тенденція переходу від великоапертурних радарів на великих КА до порівняно компактних і легких – на малих КА. Практично всі КА такого класу зосереджені на проведенні радарної зйомки в X-діапазоні, що дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю, але обмежує інші можливості зйомки. Наприклад, для додатків, де важлива здатність проникнення через поверхню, можуть бути використані C- або L-діапазони.

1. *Freeman A.* Design Principles for Smallsat SARs // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2018. URL: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2018/all2018/280 (accesed 17.01.2024).
2. *Paek S. W.* Small-Satellite Synthetic Aperture Radar for Continuous Global Biospheric Monitoring: A Review. Remote Sensing. 2020. V. 12, № 16. P. 31. https://doi.org/10.3390/rs12162546
3. *Храмов Д. О., Волошенюк О. Л.* Аналіз стану і тенденції розвитку орбітальних угруповань малих космічних апаратів для вирішення завдань землеробства. Технічна механіка. 2023. № 4. С. 31–39. https://doi.org/10.15407/itm2023.04.031
4. *Peral E. at al.* Radar Technologies for Earth Remote Sensing from CubeSat Platforms. Proceedings of the IEEE. 2018. V. 106, № 3. P. 404–418. https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2793179
5. Monitor Any Location On Earth In Near Real-Time. URL: https://www.iceye.com (accesed 25.02.2024).
6. SAR Constellation Technical Specs. URL: https://umbra.space/sar-specs (accesed 26.02.2024).
7. Capella X-SAR (Synthetic Aperture Radar) Constellation. URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/capella-x-sar (accesed 26.02.2024).
8. StriX. URL: https://synspective.com/satellite/satellite-strix/ (accesed 19.01.2024).
9. *Волошенюк О. Л.* Сучасні низькоорбітальні угруповання космічних апаратів дистанційного зондування Землі з використанням радарів із синтезованою апертурою. Технічна механіка. 2022. № 2. С. 59–70. https://doi.org/10.15407/itm2022.02.059
10. *Skolnik M. I.* Radar Handbook. 3-d Edition. NewYork: McGrawHill, 2008. 1351 p.
11. *Wertz J. R., Everett D. F., Puschell J. J.* Space Mission Engineering: The New SMAD. 1-st Edition. Space technology library. Hawthorne: Microcosm Press, 2011. 1067 p.
12. *Костров В. В., Толстов Е. Ф.* Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения. Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций. VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 76–113.
13. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
14. *Pyne B., Saito H.* Development and Performance Evaluation of Small SAR system for 100 kg Class Satellite. IEEE. 2020. V. 13. P. 3879–3891. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3006396
15. Morero A. at al. A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2013. V. 1, № 1. P. 6–43. https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301
16. *Krieger G., Gebert N., Moreira A.* Multidimensional Waveform Encoding. A New Digital Beamforming Technique for Synthetic Aperture Radar Remote Sensing. IEEE. Transactions on Geoscience and Remote. 2008. V. 46, № 1. Pp. 31–46. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905974
17. *Saito H. et al.* Compact X-Band Synthetic Aperture Radar for 100 kg Class Satellite. IEICE Transactions on Communications. 2017. V. 100, № 9. P. 1653–1660. https://doi.org/10.1587/transcom.2016PFI0008
18. *Budhaditya Pyne et al.* Development and Performance Evaluation of Small SAR System for 100-kg Class Satellite. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 3879–3891. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3006396

Отримано 21.05.2024,
в остаточному варіанті 26.06.2024