УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2022.02.059

О. Л. ВОЛОШЕНЮК

СУЧАСНІ НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ УГРУПОВАННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДАРІВ ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

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

Мета роботи полягає у визначенні сучасних тенденцій розвитку низькоорбітальних угруповань космічних апаратів (КА) з використанням радарів із синтезованою апертурою (SAR), що мають ряд суттєвих переваг у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ). Показано, що в усьому світі продовжує зростати попит на дані ДЗЗ, продукти і сервіси на їх основі. Розглянуто принципові можливості використання радарів із синтезованою апертурою у ДЗЗ. Показано основні відмінності й переваги отримання зображень за допомогою КА із SAR у порівнянні з оптичними КА. Визначено основні напрямки використання низькоорбітальних КА ДЗЗ, що несуть радіолокаційні прилади із SAR. Показано, що огляд земної та водної поверхні за допомогою КА із SAR є одним із найефективніших методів ДЗЗ. Зокрема, показано ефективність використання низькоорбітальних угруповань КА у вирішенні багатьох завдань соціально-економічної галузі та завдань, націлених на постійний оперативний моніторинг різних об’єктів. Розглянуто характеристики різних, в тому числі комерційних, низькоорбітальних угруповань КА ДЗЗ, виведених на орбіту протягом останнього десятиріччя. Розкрито проблеми та перспективи розвитку низькоорбітальних угруповань КА із SAR. Проведено огляд діючих та запланованих угруповань КА із SAR з традиційними технологіями та технологіями мінісупутникових платформ. Показано, що технічні характеристики продовжують удосконалюватись, з’являється можливість отримувати дані з будь-якого району Землі у будь-який час. Показано, що малі КА на низьких і наднизьких орбітах мають значні переваги перед традиційними КА за енергетичними характеристиками, але програють їм у тривалості сеансів зв’язку та часі активного існування. Отримані результати дають можливість виробити рекомендації щодо проєктування низькоорбітальних угруповань вітчизняних КА ДЗЗ, зокрема створення моделей і алгоритмів визначення параметрів необхідних орбіт, моделей динаміки КА.

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі, низькоорбітальні угруповання космічних апаратів, радіолокаційні прилади із синтезованою апертурою, просторова роздільна здатність, ширина смуги захвату, сцена, частота переглядів.*

The purpose of this work is to determine the current trends in the development of low-orbit constellations of spacecraft with synthetic aperture radar (SAR), which have a number of significant advantages in Earth remote sensing. It is shown that the demand for Earth remote sensing data and products and services based thereon continues to grow worldwide. The applicability of SAR to Earth remote sensing is considered. The main differences and advantages of image acquisition using SAR spacecraft in comparison with optical spacecraft are shown. The main directions of using low-orbit SAR spacecraft in Earth remote sensing are identified. Land and water surface observation using SAR spacecraft is shown to be one of the most effective remote sensing methods. In particular, it is shown that low-orbit spacecraft constellations can be used to advantage in solving many tasks in the socio-economic sector and tasks aimed at continuous real-time monitoring of various objects. The characteristics of the various Earth remote sensing spacecraft constellations, in particular low-orbit commercial ones, launched into orbit during the past decade are considered. Problems in and prospects for the development of low-orbit SAR spacecraft constellations are elucidated. Existing and planned SAR spacecraft constellations with traditional and mini-satellite platform technologies are overviewed. It is shown that the performance characteristics continue to improve, thus allowing one to get data from any area of the Earth at any time. It is shown that small spacecraft in low and ultralow orbits have significant benefits over traditional spacecraft in power characteristics, but are outperformed by them in the duration of communication sessions and active life. The results obtained make it possible to work out recommendations on the designing of low-orbit constellations of domestic Earth remote sensing spacecraft, in particular on the development of orbit determination models and algorithms and spacecraft dynamics models.

Keywords: *Earth remote sensing, low-orbit spacecraft constellations, synthetic aperture radar, spatial resolution, swath width, scene, revisit time.*

Вступ. Оперативне отримання інформації є одним із основних завдань сучасних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою забезпечення регулярного зв’язку, моніторингу техногенних аварій, стихійних лих, отримання даних видової розвідки тощо. Широке коло споживачів із різних сфер соціально-економічної галузі (будівельні, виробничі, транспортні, сільсько-

господарські, туристичні організації тощо) потребують недорогих та простих способів отримання даних ДЗЗ [1, 2]. Створення недорогих космічних апаратів (КА) ДЗЗ, їх мініатюризація дозволить суттєво знизити вартість отримуваної космічної інформації і тим самим дозволить залучити більше споживачів, зокрема на комерційній основі. В той же час, аналіз сучасного стану ДЗЗ показує, що більшість практичних підходів, спрямованих на підвищення роздільної здатності і забезпечення високої періодичності спостереження (зміна схем спостереження, висоти орбіти, характеристик знімальної апаратури, її габаритів) зручно реалізовувати за допомогою низькоорбітальних угруповань малих КА [3]. Тому створення таких угруповань КА спостереження поверхні Землі є актуальним завданням, пов'язаним з новітніми технологічними та інформаційними розробками.

Раніше, в [4] було проведено огляд низькоорбітальних угруповань КА з оптико-електронною системою спостереження (ОЕСС), значну увагу приділено аналізу створення і планам розгортання таких угруповань провідними країнами у космічній галузі. Показано ефективність використання низькоорбітальних угруповань КА з ОЕСС у вирішенні нових завдань, націлених на постійний і оперативний моніторинг різних об'єктів [3]. Але особливу роль у створенні великих низькоорбітальних угруповань відіграють радарні КА, основним завданням яких є мінімізація впливу метеорологічних умов і часу доби на отримання даних [5]. Принципова можливість радарів здійснювати спостереження поверхні Землі незалежно від її освітленості дозволяє, при виборі відповідних параметрів орбіт КА, суттєво скоротити розриви в спостереженнях або кількість КА у складі угруповання [6].

В даній роботі буде розглянуто сучасні тенденції розвитку низькоорбітальних угруповань радарних КА у спостереженні поверхні Землі. Буде проведено аналіз цілей та засобів створення угруповань малих КА ДЗЗ на низьких та наднизьких навколоземних орбітах, розглянуто їх переваги та недоліки порівняно з угрупованнями традиційних КА.

Радарні КА ДЗЗ, їх можливості та переваги використання порівняно з оптичними КА. Основне завдання використання угруповань радарних КА таке саме, як і для угруповань з оптичними КА – створення економічно ефективних систем, які можуть надавати дані з великою кількістю повторних відвідувань для побудови аналітики поточних змін об'єктів або районів спостереження. В даний час широко застосовуються і розвиваються швидкими темпами методи та апаратура ДЗЗ в радіодіапазоні (радіолокаційні системи із синтезованою антеною, скаттерометри, радіовисотоміри та інші прилади активного надвисокочастотного (НВЧ) зондування, а також пасивні мікрохвильові багатоканальні радіометри) та інфрачервоній (ІЧ) області спектра (ІЧ-радіометри та спектрометри, Фур'є-спектрометри, абсорбційні спектрометри тощо). Принципи проєктування, побудови та особливості використання радіолокаційних систем спостереження земної поверхні достатньо описані в літературі [7, 8]. В даній роботі буде розглянуто тільки принципові можливості використання радіолокаційних систем для дистанційного зондування поверхні Землі.

Ідея методу отримання високої роздільної здатності при малих розмірах антени була заснована на формуванні великої апертури антени на борту КА штучним способом. Для цього апертура синтезувалась, тобто формувалася послідовно у часі при польоті КА по певній, точно відомій траєкторії шляхом запам'ятовування, відбитого (відзеркаленого) від об'єкта електромагнітного

поля – амплітуди і фази сигналу. Радари з подібними антенами отримали назву радарів із синтезованою апертурою (РСА або SAR – Synthetic Aperture Radar). Надалі, в статті буде використовуватись скорочення SAR. Роздільна здатність SAR становить від одиниць до декількох десятків метрів, що дозволяє скористатися інформацією про фазу коливань. Так, з'явився новий напрямок досліджень – супутникова радарна інтерферометрія (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar). Супутникова радарна інтерферометрія – метод вимірювань, що використовує ефект інтерференції електромагнітних хвиль. Основна ідея методу полягає у формуванні інтерферограми, яка є результатом композиції двох радіолокаційних зображень однієї і тієї ж території, що містять інформацію про амплітуду і фазу сигналу, отриманих ідентичними радарами з близько розміщених точок орбіти. Прикладом є німецьке угруповання, що складається з 2-х КА – TerraSAR-X та TanDEM-X (2007 р. – 2026 р.) [9].

Огляд земної та водної поверхні за допомогою SAR є одним із найефективніших методів ДЗЗ. Основні відмінності й переваги отримання зображень за допомогою КА із SAR у порівнянні з ОЕСС наступні.

1 Можливість спостереження цілей невидимих в оптичному діапазоні хвиль.

2 Ефективне виконання завдань незалежно від погодних умов.

Радіолокаційний промінь проникає у хмари і практично не піддається впливу дощу, але проникаюча здатність радіолокаційних променів збільшується зі зростанням довжини хвилі. Довжина хвилі впливає не тільки на глибину проникнення в ліси, але і на інші типи поверхні Землі, такі як лід та ґрунт. Радари з довжиною хвиль більш ніж 2 см просвічують хмарність, але при цьому дощ і сніг є серйозними ускладнюючими факторами для систем з довжиною хвиль до 4 см.

3 Можливість роботи незалежно від часу й освітленості на великих відстанях і в широких зонах спостереження.

Використання радіохвиль дозволяє радіолокаційним системам крім хмарності «бачити» і у темний час доби, що, наприклад, уможливлює постійний моніторинг льодової обстановки під час полярної ночі.

4 Можливість виявлення рухомих об'єктів, спостереження цілей у високій роздільній здатності й визначення типу об'єкта, за яким ведеться спостереження, тобто можливість розрізняти фон.

Суттєвим є те, що радіолокаційні системи здатні вимірювати не тільки амплітуду, а й точний момент коливань – фазу відбитих хвиль. Так, міліметрові зміни фази між послідовними зображеннями можна використовувати для виявлення поточних змін.

5 Можливість виявлення слідів на водній поверхні шляхом формування швидкісного портрета.

Таким чином, SAR є найважливішим інструментом оперативного контролю, а також засобом довгострокових регулярних спостережень глобальних та регіональних геофізичних процесів, проведення якісної видової розвідки і забезпечення національної безпеки.

Проте ряд принципових завдань КА із SAR залишається невирішеним на сьогоднішній день, а саме такі завдання, як радіобачення в зоні під КА, високоточний вимір азимуту рухомої наземної цілі, підвищення поміхозахищеності SAR, а також супровід й оцінка параметрів повітряних цілей [10].

Основні напрямки використання КА ДЗЗ, що несуть радари із синтезованою апертурою. Тенденції розвитку області ДЗЗ, відповідно до яких розробляються перспективні КА ДЗЗ, наступні:

– збільшення відносної кількості малих КА (міні-, мікро- та нано-);

– безперервне зростання детальності космічних знімків (збільшення просторової роздільної здатності до (0,25–0,5) м);

– інтенсивне освоєння радіодіапазону (мікрохвильового) для всепогодної зйомки за допомогою радіолокаторів із синтезованою апертурою;

– поява та розширення областей застосування надспектральних зйомок (відеоспектрометричних, гіперспектральних) з числом каналів 256 і більше;

– початок інтенсивного освоєння мікро/нано технологій та створення надвеликих космічних угруповань з малими КА;

– пошук та впровадження нових методів та приладів ДЗЗ (спектрально-кутових, поляризаційних, радіозатемних тощо);

– неухильне розширення складу дослідницьких КА ДЗЗ та експериментальних програм, спрямованих на наукове вивчення Землі та відпрацювання нових методів та приладів ДЗЗ;

– активні організаційні зусилля провідних космічних країн і, насамперед, США щодо формування космічних систем глобального спостереження Землі у межах міжнародного співробітництва.

До традиційних завдань ДЗЗ на основі КА із SAR належать такі:

– моніторинг районів надзвичайних та кризових ситуацій (повеней, землетрусів, пожеж, техногенних катастроф та оцінка їх наслідків;

– кількісна оцінка біомаси, визначення складу та стану рослинного покриву;

– дослідження різних типів льодового покриву, моніторинг динаміки льодового покриву морів, льодовиків, айсбергів, визначення їх меж та оцінка вологозапасу снігового покриву;

– спостереження за зростанням міст, ресурсно-сировинне картографування, побудова високоточних цифрових моделей рельєфу, складання, супровід та актуалізація кадастрів сільськогосподарських земель;

– оперативне спостереження за повітряними, наземними та надводними рухомими об’єктами.

На рис. 1 наведено основні завдання SAR і необхідна частота отримання даних спостереження для різних категорій оточуючого середовища [11]. Для визначення частоти переглядів на рисунку наведено інтервальну шкалу з добовим кроком.

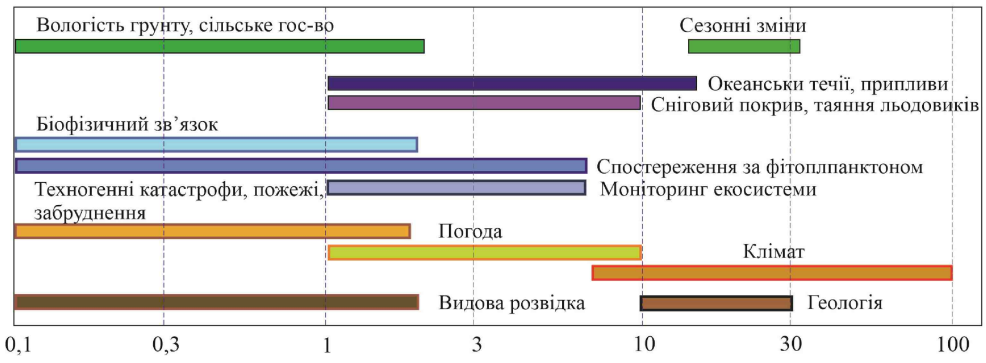

Рис. 1 – Завдання SAR і частота переглядів

З рис. 1 видно, що за періодичністю огляду діапазон вимог може простиратись від годин (у деяких випадках від 0,1 доби) до декількох місяців або років. Тому важливу роль у швидкому вирішенні цільових завдань відіграють угруповання КА, що мають можливість з достатньо високою частотою переглядів виявляти поточні зміни оточуючого середовища. І в таких завданнях, незалежно від метеорологічних умов та часу доби, КА ДЗЗ із SAR є ефективним засобом отримання оперативної та довготривалої інформації про стан і динаміку об'єктів та районів поверхні Землі у глобальних та регіональних масштабах [5].

Низькоорбітальні угруповання традиційних КА із SAR. В даний час найінтенсивніше освоюються низькі та наднизькі навколоземні кругові орбіти висотою від 500 км до 1500 км, і навіть еліптичні висотою до 2000 км. КА на низьких навколоземних орбітах (ННО) мають значні переваги перед іншими КА за енергетичними характеристиками, але програють їм у тривалості сеансів зв'язку та часу активного існування. Період обертання КА на таких орбітах становить від ~ 90 хв до 2 годин, а максимальний час перебування КА у зоні радіовидимості не перевищує (10 – 15) хв. Таким чином, чим менша висота орбіти, тим менша миттєва зона обслуговування, і у випадку глобального обзору необхідна значно більша кількість КА. Практично, у всіх випадках для угруповань КА із SAR використовуються сонячно-синхронні орбіти (ССО), площини яких прецесують синхронно з рухом Землі навколо Сонця (з середньою кутовою швидкістю $\omega_c \sim 0{,}9856$ град/добу або $0{,}199106 \cdot 10^{-6}$ рад/с). ССО цікаві тим, що сонячний час проходження КА над одними і тими ж точками траси (отже, й умови освітленості підсупутникових точок) від витка до витка мало змінюється. Деякі відмінності викликані тим, що Сонце на небесній сфері рухається у площині екліптики, а не у площині екватора, і з цього переміщується з однієї півкулі Землі до іншої. Місцевий час у кожній фіксованій точці ССО теж залишається «майже постійним» протягом усього польоту і визначається фактично часом старту КА.

Традиційні КА є великими і середніми супутниками з масою більш ніж 500 кг [11], вони спроєктовані за традиційними принципами, які не торкаються конструктивних особливостей за масою та розміром. Традиційні КА із SAR характеризуються просторовою роздільною здатністю від 1 м до 100 м, можливістю зйомки у всіх поляризаційних режимах, широким діапазоном площ кадрів, кутів зйомки та дуже високою продуктивністю, а також можливістю моніторингової зйомки через декілька днів (2–3 дні). Однак дані деяких КА, наприклад, італійського угруповання CosmoSkyMed, не завжди придатні для цивільного використання, оскільки не завжди дотримуються терміни та періодичність зйомок [12]. Німецьке угруповання КА TerraSAR-X та TanDEM-X значно надійніше в плані поставок і дотримання термінів. Серед важливих особливостей цього угруповання слід відзначити високу точність визначення орбіти і, відповідно, дуже низьку помилку геолокації знімків [13]. На даний час, дані з канадського угруповання КА RadarSat Constellation Mission (RCM) є найбільш актуальними і підходять для вирішення практично будь-яких завдань ДЗЗ [14]. Угруповання RCM забезпечує цілодобове покриття радарною зйомкою території Канади і має щоденний доступ до 90 % поверхні Землі. Дані можуть включати повторні знімки одних і тих же районів у різний час доби. Можливість значного прискорення обробки даних

дозволяє отримувати необхідну інформацію практично у реальному режимі часу. В таблиці 1 наведено технічні дані більш відомих діючих традиційних КА із SAR, виведених в період останнього десятиріччя. Ці КА доповнили існуючі та створили нові низькоорбітальні угруповання.

Табл. 1 – Огляд діючих низькоорбітальних угруповань КА із SAR, виведених на орбіту на протязі останніх десяти років

Місія КА, запущено/ заплановано	Країна, рік	Діапазон частот, поляризація	Роздільна здатність, м/піксель	Ширина смуги захвату/ сцена, км	Висота орбіти, тип, км	Маса, кг
GF-3, 1/1	Китай, 2016-2024	C, single, quadruple	1 (SL) 3-5 (SM) 25 (SC) 100 (WS)	10×10 30-50 130 500	758, ССО	2950
GF-12, GF-12-02 2/2	Китай, 2019, 2021	C	–	–	635, ССО	2950
RiSat-2B, 2BR1, 2BR2 3/3	Індія, 2019, 2020	X, single	1 (SL) 3 (SM) 25 (SC)	10 10 50	555, drifting	615
CSG-1, 2, 1/2	Італія, 2019-2028	X, single, double, quadruple	0,63 (SL) 3×3 (SM) 4×20 (SC)	10 30 100	619, ССО	2205
Sentinel-1B, 1C, 1D, 1/3	ЕКА, 2014	C, single, double	4×5 (SM) 5×20 (SC) 25×80 (WS)	80 240 400	693, ССО	2300
KompoSat-5,6*****,7, 1/3	Корея, 2013	X, S, single	1 (SL) 3 (SM) 20 (WS)	5 30 200	550, ССО	1400
SeoSar (Paz), 1/1	Іспанія, 2018	X, single	1 (SL) 3 (SM) 15 (SC)	5 30 100	514, ССО	1341
Alos-2,3*,4, 1/3	Японія, 2014-2029	L, single, double	1-3 (SL) 3-6 (SM) 100 (SC)	25 50 350	640, ССО	2000
Asnaro-2, 1/1	Японія, 2018	X, single	1 (SL) 2 (SM) 16 (SC)	10 12 50	500, ССО	570
Meteor-M N2-2, 3	Росія, 2019, 2021	X, single	1 (SL) 5 (SM) 50 (SC) 500 (WS)	10 30 130 750	820, ССО	2900
RCM-1, 2, 3, 3/3	Канада, 2019	C, single, double	1-3 (SL) 5-16 (SM) 100 (SC)	20 30 500	586-615, ССО	1400
NovaSAR-S, 1/3	Британія 2018-2025	S, single, double, triruple	6 (SM) 20 (SC) 33 (WS)	13-20 50-100 195	580, ССО	430
Saocom-1A, 1B, 2/4	Аргентина, 2018-2026	L, single, double,	5-10(SM) 30 (TS) 50 (TS)	40×74 150×222 350×445	620, ССО	3000
SL – Spotlight (прожекторний режим), SM – Stripmap (маршрутний режим), SC – ScanSAR (режим сканування), WS – Wide ScanSAR (оглядовий режим), TS – Top SAR (прогресивний режим)						

Деякі угруповання поєднують в собі радарні та оптичні КА, наприклад, серія китайських КА GaoFen (GF) (в таблиці наведено тільки радарні), корейське угруповання KompoSat та японське Alos, в цих угрупованнях в таблиці (*) позначено оптичні КА. Дані таблиці дозволяють виділити провідні країни в розвитку низькоорбітальних КА ДЗЗ, провести порівняльні оцінки характеристик окремих угруповань КА, зокрема роздільної здатності, ширини смуги захвату, в залежності від даних SAR і висоти орбіти [15–16].

Крім підвищення просторової роздільної здатності, важливою тенденцією у розвитку радарних КА є розширення поляризаційних можливостей. Традиційні КА можуть проводити одночасну зйомку в одній, двох, трьох та чотирьох поляризаціях випромінювання, що покращує класифікацію культур, рослинний покрив, тип або стан лісу, вологість ґрунту, покращання виявлення судів тощо. Таким чином, унікальна особливість повністю поляриметричних даних полягає у можливості класифікації об’єктів на знімку за фізичним типом відображення. У таблиці 1 також наведено дані поляризаційних режимів, у яких проводиться зйомка (single, double, triruple, quadruple, відповідно одночасне проведення зйомки в одній, двох, трьох або чотирьох поляризаціях).

Аналіз даних табл. 1 показує, що мініатюризація КА з радіолокаційною системою спостереження протягом останнього десятиліття йшла досить повільно порівняно з КА з ОЕСС [3–4] через відсутність готових комерційних компонентів, а також складні вимоги до конструкції платформ радарних КА. І лише починаючи з 2018 р. проводяться запуски малих КА із SAR, масою менш ніж 500 кг (NovaSAR-S) [17]. Для прикладу, в таблиці 2, починаючи з 1991 р., представлено дані КА із SAR (країна, рік запуску, маса та діапазон частот), за цими даними можна прослідкувати за інноваційними рішеннями в технологіях створення КА, що приводять до їх мініатюризації.

Табл. 2 – Огляд КА із SAR і значення їх мас

КА із SAR	Країна	Рік запуску	Маса, кг	Діапазон частот
ERS-1/2	ЕКА	1991/95	2384	C
RadarSat-1	Канада	1995	2200	C
SAR Lupe	Німеччина	2006	770	X
Alos-1	Японія	2006	4000	L
TerraSAR-X	Німеччина	2007	1230	X
RadarSat-2	Канада	2007	2200	C
CosmoSkyMed	Італія	2007	1700	X
TecSAR	Ізраїль	2008	300	X
Tandem-X	Німеччина	2010	1340	X
HJ-1C	Китай	2012	890	S
RiSat-1	Індія	2012	300	X
KompSat-5	Корея	2013	1400	X
Sentinel-1a/b	ЕКА	2014/16	2300	C
Alos-2	Японія	2014	2120	L
IceEye-1	Фінляндія	2018	80	X
NovaSAR-S	Великобританія	2018	350	S
Capella Space	США	2018	40	X
RainCube	США	2018	12	Ka
SeoSar (Paz)	Іспанія	2018	1350	X
RiSat-2B	Індія	2019	615	X
Harbinger	США	2019	150	X

Як видно з табл. 1, 2, в основному КА із SAR, що запускалися в період з 1991 р. по 2018 р. є супутниками з масою в межах (800–4000) кг. Два КА з масою 300 кг (TecSAR, RiSat-1) були єдиними малими КА запущеними до 2018 р. Ці КА відносяться до радіолокаційних розвідувальних КА, збудованих компанією Israel Aerospace Industries (IAI), і відповідають можливостям запуску ізраїльської ракети-носія (РН) Shavit. Як показано в табл. 2, більшість запусків малих КА починається з 2018 р. і пропонується як частина угруповань КА, що надають комерційні послуги.

Низькоорбітальні угруповання малих КА із SAR. В останні роки велику популярність в провідних космічних агентствах набула мініатюризація КА. Застосування малих КА виправдано як в якості основи для формування надвеликих угруповань, так і угруповань з декількома КА або одиночних запусків з метою різкого зниження собівартості космічної інформації ДЗЗ. Програючи в комплексності спостережень, малі КА виграють у зниженні загальних витрат на виготовлення та запуск. Такі КА можна виготовляти серійно і запускати декілька раз, знижуючи ризики розробки й експлуатації, що зазвичай пов’язані з великими КА.

Основна мета функціонування угруповань малих КА із SAR на низьких орбітах – забезпечення досить високої періодичності спостереження і оперативності зйомки цільових районів або об’єктів, оскільки багато потенційних програм для обробки даних включають об’єкти, які дуже швидко змінюються в часі (до доби і менш), такі як місцезнаходження суден або ліквідація наслідків стихійних лих, вирішення завдань видової розвідки тощо (рис. 1).

Донедавна SAR було важко реалізувати на малих КА, однак мініатюризація електронних компонентів та останні технологічні досягнення, наприклад, технологія підсилювача з нітриду галію (GaN), що скорочує кількість елементів в антені, управління енергоспоживанням на борту КА завдяки використанню нової високоефективної технології напівпровідникового підсилювача S-діапазону та використання інноваційного корисного навантаження (КН), зробили SAR сумісними з невеликими КА [18]. У свою чергу недорогі рішення для малих КА дають можливість розширити сферу додатків SAR і, як наслідок, збільшити кількість комерційних користувачів даних спостереження Землі. На рис. 2 представлено загальну класифікацію малих КА, з них для угруповань КА із SAR використовуються міні- та мікро- КА [11].

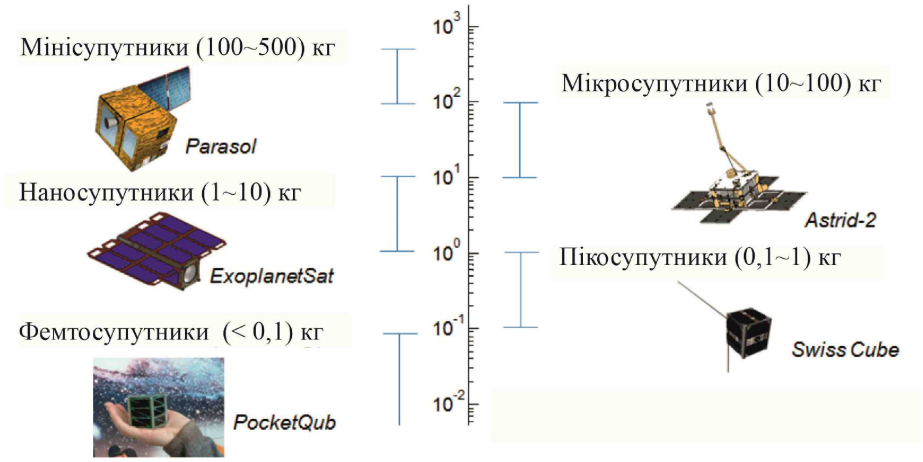

Рис. 2 – Класифікація малих КА

Аналіз сучасних публікацій [11, 19–20] показує, що понад десяти компаній оголосили про плани розвитку комерційних угруповань з великою кількістю КА із SAR протягом наступних п'яти років. Спочатку Capella Space виникла в США, Iceye Inc. в Європі, StriX та iQPS в Японії і Spacety в Китаї. В США також розробляються й інші проєкти великих угруповань КА, такі як Umbra, PredaSAR, EOS. Такий географічний розподіл підкреслює насамперед інтерес використання угруповань КА із SAR до питань суверенітету. Також ці компанії націлені на такі ринки, як фінанси, енергетика, моніторинг інфраструктури, сільське господарство, реагування на стихійні лиха тощо.

В даний час лідируючу позицію на ринку інформації ДЗЗ серед комерційних діючих угруповань займає фінська компанія Iceye Inc., яка розробила угруповання малих КА із SAR з аналогічною назвою ICEYE [21]. В процесі розробки КА пройшли три модифікації по роздільній здатності, спочатку розроблялися апарати з роздільною здатністю (10×10) м, потім (3×3) м і були доведені до (1×1) м. Планується, що угруповання складатиметься з 18 КА, забезпечуючи періодичність спостереження за морською обстановкою (виявлення та стеження за кораблями) за кілька годин. Вибрані характеристики орбіти КА і параметри SAR забезпечують унікальні можливості щодо оперативності зйомки: час від заказу до проведення зйомки цільового об'єкта не перевищує 3-х годин. Також угруповання ICEYE призначене для моніторингу льодової обстановки та контролю розливів нафти.

Конкурентами компанії Iceye Inc. на ринку радіолокаційних систем є американські компанії Capella Space та Umbra Lab., які також займаються розробкою малих КА із SAR [22–23] і прагнуть перевершити її за рівнем роздільної здатності та періодичністю спостереження. Компанія Capella Space планує запустити угруповання з 36 КА, яке забезпечить періодичність спостереження до 1 години. За даними компанії, КА із SAR X-діапазону, що має ширину спектра зондувального сигналу 500 МГц, з висотою орбіти (485–525) км та нахилом $i = 97°$ забезпечуватиме роздільну здатність у режимі прожектора «Spotlight» до 0,5 м. Компанія Umbra Lab. анонсувала створення угруповання з 12 КА з роздільною здатністю сцени (10×0,25) м. Так, при роздільній здатності 1 м буде забезпечуватись періодичність спостереження в 1 годину [23].

В таблиці 3 представлено характеристики більш відомих проєктів угруповань малих КА ДЗЗ із SAR, частково запущених та запланованих до запуску в найближчі 3-4 роки. В основі даних угруповань КА лежать інноваційні технології створення мінісупутникових платформ масою до 500 кг, включаючи міні- та мікро- КА [12–13, 19].

Характеристики КА, наведені в табл. 3, вказують на те, що на даний час відзначається тенденція переходу від великоапертурних радарів на великих КА до порівняно компактних і легких – на малих КА. Всі представлені угруповання малих КА розміщені на низьких і наднизьких ССО, забезпечуючи систематичну зйомку поверхні Землі з мінімальним часовим інтервалом перегляду будь-якого району. Практично всі угруповання КА зосереджені на області X-діапазону, тим самим прокладаючи шлях для додатків з дуже високою роздільною здатністю за рахунок інших можливостей, таких як більша здатність проникнення через поверхню, наприклад, C- або L- діапазони.

Табл. 3 – Огляд діючих та запланованих угруповань КА із SAR, з технологіями міні супутникових платформ, та їх основні характеристики

Місія КА, запущено/заплановано	Країна, рік запуску	Діапазон частот, поляризація	Роздільна здатність, м/піксель	Ширина смуги зйомки/ сцена, км	Висота орбіти, км, тип	Маса, кг
EOS SAR, 0/12, 6 SAR + 6 optical	Україна, США, 2023	X, single, double; S, quad	0,5×0,25 (SL) 1×1,5 (SM) 2×3 (SC)	25 25 50	ННО, ССО	200–250
Spacety, 1/56	Китай, 2020	C, single (VV); X	1 (SL) 3 (SM) 10 (SC)	5×5 20 50	512, ССО	185
SmallSat InSAR, 0/12	США, 2023	S	10	80	600, ССО	180
iQPS, 2/36	Японія, 2019	X	1–10	–	560, ССО	100–150
Micro XSAR, 0/15	Японія	X, single (VV)	1 (SL) 3 (SM)	10 10	600	135
StriX, 1/30	Японія, 2020	X, single (VV)	1 (SL) 3 (SM)	10 30	561, ССО	100
XR, 0/8	США, 2022	X, single (VV)	Хар-ки аналогічні КА ICEYE-X5		550, ССО	90
ICEYE, 14/18	Фінлянд-дія, 2018	X, single (VV)	1 (SL) 3 (SM) 20 (SC)	10×5 35 120	500-580, ССО	85
Umbra, 1/24	США, 2021	X, single (VV/HH)	0,15–2 (SL) 1–2 (SM) 10 (OC)	4×4 6–20 85–450	560, ССО	70
MicroSAR System, 0/10	Норвегія	C	4	200	500	65
Capella Space, 6/36	США, 2018	X, single (HH)	0,3-0,5 (SL) 1 (SL) 10-30 (SM)	5×10 5×20	525, ССО	48
PredaSAR, 0/96	США, 2022	C, X	–	–	ННО + ССО	350-400
Xpress-SAR, 0/4	США, 2024	X	0,25 (SL) 1 (SL) 3 (SM)	5×5 10×10 30×2000	425, i=35°	–
SL – spotlight (прожекторний режим), SM – stripmap (маршрутний режим), SC – ScanSAR (режим сканування), OC – ocean scanning (сканування океану), HH – випромінюється та приймається горизонтальна поляризація, VV – випромінюється і приймається вертикальна поляризація						

Таким чином, угруповання малих КА на НІО відкрили можливість отримання найбільш актуальної інформації за короткий час та можливість роботи з невеликими замовленнями. Тобто основними факторами формування конкурентної пропозиції є гнучкість і зручність отримання інформації ДЗЗ, вартість і швидкість доставки зображень. Але проводячи порівняльні оцінки окремих КА з угруповань з традиційними та малими КА бачимо сут-

тєву перевагу великих супутників. В таблиці 4 наведено порівняльні характеристики окремих КА угруповань з традиційними та малими КА із SAR. Найцікавішими для аналізу можна вважати традиційний КА – TerraSAR-X, а також фінський перспективний демонстратор сучасних технологій КА радіолокаційного спостереження 30-ти килограмового класу – ICEYE-X5, призначений для моніторингу льодової обстановки.

Табл. 4 – Порівняльні характеристики окремих КА із SAR (TerraSAR-X та ICEYE-X5)

Характеристики КА	TerraSAR-X (TSX)	ICEYE-X5
Ціна виготовлення, млн. доларів	~ 220	~ 10–15
Маса платформи, кг	~ 1100 (540 кг – КА, 294 кг – КН, 78 кг – пальне)	~ 80 (25 кг – КА, 30 кг – КН, 25 кг – ДУ)
Кількість КА, запущено/заплановано	2/4	14/18
Площа антени, м^2	3,36	1,28 (3,2×0,4)
Час зйомки на витку, с	320–900	150
Просторова роздільна здатність, м/піксель	0,25 (SL)	< 0,25
Частота переглядів глобальна зйомка, години	4 КА: 3–6 годин – 90 %, 12 годин – 100 %	18 КА: до 1 години
Точність геоприв'язки, м	< 1 м (SL)	< 10 м (6,6–9,9)
Ширина смуги захвату/сцена – (min-max), км	4×3,7 – 270×200	5×5 – 30×50
Рівень шуму (NESZ), дБ	-21– -35	-17– -21
Поляризаційні режими	single, dual, quad	single (VV)
Режим (WS)	так	ні

За результатами табл. 4 бачимо, що характеристики рівня шуму (Noise equivalent sigma zero – NESZ) угруповань традиційних КА (апарати класу TerraSAR-X, CSG) або контраст між об'єктами кращий порівняно з малими КА. Те ж саме і з поляризацією: угруповання малих КА пропонують лише одиночну поляризацію незалежно від режиму, у той час як традиційні КА можуть пропонувати подвійну або квадратичну поляризацію, що покращує класифікацію об'єктів спостереження. Малі КА також пропонують менше режимів збору даних: більш грубу роздільну здатність з більшою смугою огляду, оглядовий режим "WideScan" недоступний для угруповань малих КА. Нарешті, точність геолокації набагато краща для традиційних апаратів: ICEYE X-5 оцінюється між (6,6–9) м у порівнянні з TerraSAR-X – 1 м у режимі прожектора "Spotlight".

Висновки. Потреба в систематичній суцільній зйомці поверхні Землі з мінімальним інтервалом між переглядами будь-якого району з прийнятними витратами на виготовлення та запуск призвела до корінних змін структури космічних засобів дистанційного зондування Землі. Перехід від зйомки тих чи інших об'єктів або територій традиційними КА з високою деталізацією знімків до систематичної глобальної зйомки забезпечили багатоскладові угруповання малих КА на низьких навколоземних орбітах з підтриманням структури розміщення апаратів в декількох орбітальних площинах і поповненні необхідної кількості КА після закінчення терміну активного існування

або сходу КА з орбіти. Малі КА є не тільки життєздатними платформами для вирішення поточних завдань, але також відкривають нові можливості для розвитку науки і унікальних додатків.

Зростаюча потреба у створенні КА, що несуть радіолокаційні прилади із синтезованою апертурою нового покоління обумовлена прагненням отримати прийнятні за вартістю угруповання малих КА на НІО, які забезпечують досить високу періодичність спостереження і можливість зйомки незалежно від погодних умов і часу доби.

1. *Дворкин Б. А., Дудкин С. А.* Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли. Геоматика. 2013. № 2. С. 16–36.
2. *Данилова Т. Д., Нафиева Е. Н., Тарасова П. Д.* Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2018 г. и дальнейшие перспективы. Геопрофи. 2019. № 1. С. 16–19.
3. *Бакланов А. И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. № 3. С. 17–28. https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.17.28
4. *Волошенюк О. Л.* Світові тенденції розвитку низькоорбітальних космічних систем оптико-електронного спостереження Землі. Технічна механіка. 2020. № 3. С. 39–53. https://doi.org/10.15407/itm2020.03.039
5. *Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M.* 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
6. *Лысенко А. А., Улыбышев С. Ю.* Методика орбитального построения спутниковой системы для решения задачи оперативного глобального мониторинга. Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 11. С. 9. URL: http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1699. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1699
7. *Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В.* Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. 1999. С. 177.
8. *Фомин А. Н., Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Андреев С. Н. Ищук И. Н. Купряшкин И. Ф, Гречкосеев А. К.* Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 292 с.
9. TDX (TanDEM-X: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). URL: https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x (accesed 16.12.2021).
10. *Леухин А. Н., Безродный В. И., Воронин А. А.* Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны. Учен. Зап. Казан. Ун-та Сер. Физ-матем. науки. 2018. Т. 160, кн. 1. С. 25–41.
11. *Paek S. W., Balasubramanian S., Kim S., De Weck O.* 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 (accesed 18.12.2021). https://doi.org/10.3390/rs12162546
12. Cosmo-SkyMed (Constellation of 4 SAR Satellites). URL: https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed (accesed 24.12.2021).
13. AOCS for TanDEM-X Formation flight at 200m separation in low-Earth orbit. URL: https://elib.dlr.de/67867/1/Man204529.pdf (accesed 26.12.2021).
14. What is the RCM? URL: https://.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/what-is-rcm.asp (accesed 24.01.2022).
15. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR). URL: https://space.oscar.wmo.int/satellites/ (accesed 23.01.2022).
16. New Space Index. Concise original overview of commercial satellite constellations, small satellite rocket launchers and NewSpace funding options. URL: https://www.newspace.im/ (accesed 24.02.2022).
17. NovaSAR-S. URL: https://www.sstl.co.uk/Missions/NovaSAR-S/NovaSARS/NovaSAR-S-Small-satellite-Synthetic-Aperture-Radar (accesed 24.02.2022).
18. *Filippazzo G., Dinand S.* The Potential Impact of Small Satellite Radar Constellations on Traditional Space Systems. 5th Federated and Fractionated Satellite Systems Workshop. Toulouse, France, 2017. P. 12.
19. *Голов Н. А., Усачов В. А., Корянов В. В., Топорков А. Г.* Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса. Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 5. С. 20. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1881
20. *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
21. Monitor Any Location On Earth In Near Real-Time. URL: https://www.iceye.com (accesed 25.02.2022).
22. SAR Constellation Technical Specs. URL: https://umbra.space/sar-specs (accesed 26.02.2022).
23. Capella X-SAR (Synthetic Aperture Radar) Constellation. URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/capella-x-sar (accesed 26.02.2022).

Отримано 22.05.2022,
в остаточному варіанті 09.06.2022