

МІКРОХВИЛЬОВІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ З КОСМОСУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ*Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: dakhramov@gmail.com*

Мікрохвильове дистанційне зондування дає змогу отримувати інформацію у будь-який час доби, незалежно від сонячного освітлення і в широкому діапазоні метеорологічних умов, що дає їй перевагу порівняно з методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які використовують оптичний і тепловий діапазони електромагнітного випромінювання. Разом з тим, можливості застосування мікрохвильових методів використовуються в комерційних космічних апаратах (КА) ДЗЗ далеко не повністю. У роботі проведено аналіз тенденцій розвитку мікрохвильового ДЗЗ, спрямований на виявлення перспектив використання цих методів в угрупованнях комерційних КА ДЗЗ. Розглянуто мікрохвильову радіометрію, альтиметрію, скаттерометрію і радарну зйомку. Показано, що, завдяки державному замовленню, мікрохвильові радіометри в найближчі кілька років будуть масово представлені на борту американських малих комерційних метеосупутників. Найближчими роками можна очікувати тестування на орбіті гіперспектральних мікрохвильових радіометрів, які також становлять інтерес для розв'язання завдань національної безпеки та оборони. Розміщення радарних альтиметрів і скаттерометрів на борту малих КА наразі технічно можливе, але не затребуване. Ці прилади призначені насамперед для оглядових спостережень за поверхнею океану. Поява альтиметрів і скаттерометрів на борту малих КА може бути викликана потребами військової метеорології, необхідністю поліпшення якості прогнозів погоди на морських театрах військових дій. Напрямок мікрохвильового ДЗЗ, який найактивніше розвивається, є космічна зйомка за допомогою радарів із синтезованою апертурою. В останнє десятиліття відбулася заміна одиночних великогабаритних розвідувальних радарних КА багатосупутниковими угрупованнями малих КА. Особливий інтерес представляє побудова оперативних цифрових моделей земної поверхні, як один із нових напрямів застосування радарних даних. Перехід на більш високочастотні діапазони зйомки, що намітився у низці китайських компаній, дасть змогу домогтися більш високої просторової роздільної здатності з меншими витратами.

Ключові слова: мікрохвильовий радіометр, радар, скаттерометр, альтиметр, цифрова модель поверхні, інтерферометрія, поляриметрія.

Microwave remote sensing (RS) allows one to obtain information at any time of day, regardless of solar illumination and in a wide range of meteorological conditions, which gives it an advantage over Earth RS methods using the optical and thermal ranges of electromagnetic radiation. At the same time, the potentialities of microwave methods are not fully utilized in commercial RS spacecraft. This paper analyzes trends in the development of microwave RS aimed at identifying the prospects for the use of these methods in commercial RS satellite constellations. Microwave radiometry, altimetry, scatterometry, and radar imaging are considered. It is shown that, due to government contracts, microwave radiometers will be massively used onboard U.S. small commercial weather satellites in the next few years. On-orbit testing of hyperspectral microwave radiometers, which are also of interest for national security and defense applications, may be expected in the coming years. The use of radar altimeters and scatterometers onboard small satellites is currently technically possible, but not in demand. These instruments are designed primarily for monitoring the ocean surface. The onboard use of altimeters and scatterometers may be caused by the needs of military meteorology and the need to improve the quality of weather forecasts in maritime theaters of war. The most actively developing line of microwave RS is space imagery using synthetic aperture radars. In the last decade, single large-size reconnaissance radar satellites have been replaced by multi-satellite constellations of small spacecraft. Of special interest is the development of operational digital models of the Earth's surface as one of the new areas of radar data application. A transition to higher-frequency bands for imaging, which has been outlined in a number of Chinese companies, will make it possible to achieve a higher spatial resolution at a lower cost.

Keywords: microwave radiometer, radar, scatterometer, altimeter, digital surface model, interferometry, polarimetry.

Дистанційне зондування з космосу за допомогою мікрохвильового випромінювання дає вченим унікальну інформацію про вітер над поверхнею моря, напрямок поширення хвиль, солоність океану, стан крижаного та снігового покриву, вологість ґрунту, біомасу рослин, стан атмосфери, рельєф та деформації земної поверхні тощо. На відміну від диістанційного зондування Землі (ДЗЗ) видимого та інфрачервоного діапазону, мікрохвильове ДЗЗ можна вести у будь-який час доби, незалежно від сонячного освітлення і в широкому

погодному діапазоні. Усе це привертає до мікрохвильових методів ДЗЗ інтерес великої кількості дослідників різних спеціальностей – метеорологів, океанологів, геофізиків, геологів, ґрунтознавців тощо.

В останнє десятиліття розвиток ДЗЗ з космосу тісно пов'язаний з використанням малих космічних апаратів (КА), зібраних у багатосупутникові орбітальні угруповання. Як правило, подібні угруповання належать комерційним компаніям.

Переважна більшість комерційних угруповань ДЗЗ використовує оптичні методи спостереження, перспективи застосування яких розглянуто в [1]. Серед мікрохвильових методів ДЗЗ активно використовується єдиний метод – радіолокаційний (радарний). У зв'язку з цим актуально є задача виявлення перспективних методів мікрохвильового ДЗЗ, придатних для використання на малих КА ДЗЗ та їхніх угрупованнях. Наскільки відомо авторам, подібну задачу у вітчизняній науковій літературі за останні десять років не розглядали.

Мета роботи полягає в тому, щоб виявити перспективні напрямки мікрохвильових методів ДЗЗ з космосу для реалізації на малих КА. Будуть розглянуті проєкти з використання мікрохвильових методів ДЗЗ з космосу – як пасивних, так і активних. Короткий історичний екскурс на початок кожного розділу присвячений не лише опису розвитку методу, а й проєктам, які можуть стати орієнтиром для досягнення певних характеристик або основою для нових проєктів на досконалішій технологічній базі.

Джерела інформації. Якщо не вказані інші джерела, то дані про КА ДЗЗ та їхню апаратуру взято з веб-ресурсів: Satellite Missions catalogue (<https://www.eoportal.org/satellite-missions/>), Gunter's Space Page (<https://space.skyrocket.de>) і WMO OSCAR (<https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>). Дані про КА ESA Sentinel взяті з ресурсу Sentinel Online (<https://sentinels.copernicus.eu/>).

Пасивні й активні методи спостереження. До пасивних мікрохвильових методів ДЗЗ належить радіометрія, яка займається виявленням сигналів теплового шуму, що виробляється поверхнею Землі і вищерозміщеною атмосферою в діапазоні довжин хвиль 1 м – 1 мм. Характеристики прийнятого випромінювання (інтенсивність, поляризаційні властивості, частота і зміни кута спостереження) залежать від форми і матеріалу спостережуваних об'єктів.

Активні мікрохвильові методи – це різні види радарів (англ. radar – скорочення від RADio Detection And Ranging), які використовують енергію у вигляді електромагнітної хвилі в мікрохвильовій частині спектра, щоб генерувати і випромінювати імпульси, спрямовані в бік земної поверхні, а потім вимірювати відбитий сигнал. Супутникові радары, як правило, працюють в інтервалі між Р-діапазоном (близько 300 МГц) і К-діапазоном (близько 30 ГГц). Мікрохвильове випромінювання спрямовується в бік поверхні Землі – або безпосередньо вниз під датчик (у надир), або під кутом (радары бічного огляду).

Застосування радарів залежить від характеру випромінюваного імпульсу і від того, які властивості відбитого імпульсу вимірюються. Для радарів, спрямованих у надир, оцінка часу на повернення імпульсу після відбиття від поверхні дає змогу виміряти висоту поверхні. Цей тип радара називається альтиметром (висотоміром).

Радари бічного огляду вимірюють інтенсивність (або амплітуду), фазу і поляризацію відбитого сигналу (зворотного розсіювання) і поділяються на

дві категорії. Перші – скатерометри – вимірюють середнє зворотного розсіювання по широкому полю огляду і мають низьку просторову роздільну здатність. Другі мають значно вищу просторову роздільну здатність і дають змогу побудувати зображення спостережуваної поверхні. Висока просторова роздільна здатність забезпечується за рахунок синтезу апертури – технології створення віртуальної великої антени, використовуючи рух супутникової платформи. Такі радары називають радары із синтезованою апертурою (англ.: Synthetic Aperture Radar або SAR). Оскільки всі космічні радары, призначені для зйомки поверхні Землі, є радары із синтезованою апертурою, ми будемо опускати вказівку на метод створення апертури і називати прилади цієї категорії просто радары.

Мікрохвильова радіометрія зародилася в 1940–50-ті рр. як допоміжний напрям радіоастрономії. Йшлося про виключення впливу хмарної (а потім і газової) складової випромінювання атмосфери в мікрохвильовому діапазоні на високоточні радіоастрономічні вимірювання, що проводяться з поверхні Землі. Таким чином, перешкоди під час астрономічних вимірювань стали об'єктом дослідження мікрохвильової радіометрії.

Виявлене мікрохвильовим радіометром на борту супутника теплове випромінювання генерується на поверхні Землі, а також у всій прилеглий атмосфері. Відповідно, супутникові мікрохвильові радіометри, починаючи з найбільш ранніх моделей, працюють на кількох частотах і використовуються одночасно в дослідженнях поверхні Землі та атмосфери – для вимірювання параметрів поверхні моря (температури поверхні моря, приповерхневої швидкості вітру, солоності), полярних областей (параметри льоду) та суші (параметрів вологості снігу й ґрунту), а також для вимірювання параметрів атмосфери (вмісту водяної пари, вмісту вологи в хмарах, швидкості випадання опадів і т. п.).

Перші у світі мікрохвильові вимірювання Землі було здійснено з радянського супутника «Космос-243», запущеного 23 вересня 1968 р. Вимірювання велися на частотах 3,4; 9,6; 22,2 і 37,0 ГГц у трасовому режимі.

Практичне застосування мікрохвильових радіометрів почалося наприкінці 1970-х рр., коли на американських супутниках NOAA було встановлено прилад Microwave Sounding Unit (MSU) для вимірювання профілю температури атмосфери на частотах (50 – 58) ГГц [2]. У 1987 р. за програмою Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) міністерства оборони США на орбіту було запущено КА F08. На супутнику було встановлено сканер Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), який приймав випромінювання Землі на частотах 19,3; 22,2; 37,0 і 85,5 ГГц для визначення параметрів поверхні та інтегральних параметрів атмосфери [3].

Розвиток супутникової мікрохвильової радіометрії довгий час йшов, головним чином, за двома напрямами. Поперше, розширювався частотний діапазон вимірюваного радіотеплового випромінювання. Так, на сучасних європейських метеосупутниках MetOp-SG встановлюють конічний скануючий мікрохвильовий радіометр MWI, що приймає випромінювання в 26 каналах – від 18,7 ГГц до 183,3 ГГц – для комплексного аналізу атмосфери, океану і поверхні суші.

Подруге, збільшувалася точність вимірювань, для чого розроблялася високочутлива приймальна апаратура, і підвищувалася просторова роздільна здатність. Мікрохвильові радіометри космічного базування мають роздільну здатність від одиниць до десятків кілометрів [4]. Для підвищення просторової

роздільної здатності необхідно працювати на дуже низьких висотах або зменшувати ширину променя, збільшуючи розмір антени. Так, діаметр антени на супутнику NASA SMAP становить 6 м. Ще одним способом підвищення просторової роздільної здатності даних мікрохвильової радіометрії є їх спільне використання з даними активних (радарних) спостережень.

С початку XXI століття намітилися ще два напрямки розвитку супутникової радіометрії, що обіцяють подальше збільшення точності та розширення переліку визначуваних дистанційно параметрів. Це – поляризаційні мікрохвильові вимірювання і застосування в радіометрії принципів синтезу апертури, що зарекомендували себе в радарній зйомці.

Першим радіометром, який продемонстрував можливості поляриметричних вимірювань, став прилад WindSat, встановлений на американському військовому метеосупутнику Coriolis (запущено у 2003 р.) [5]. WindSat дав змогу вимірювати з космосу вектор вітру на поверхні океану, що раніше було доступно тільки активним мікрохвильовим датчикам – скаттерометрам. Крім швидкості та напрямку вітру, прилад також вимірював температуру поверхні моря, вологість ґрунту, характеристики льоду і снігу, водяну пару, рідку воду в хмарах і швидкість дощу.

Наступним етапом отримання інформації на основі поляриметричних даних мікрохвильових радіометрів стала американська програма зі створення військових метеосупутників Weather System Follow-on-Microwave (WSF-M). Супутники WSF-M використовують дані мікрохвильового радіометра для вимірювання швидкості та напрямку вітру на поверхні океану на частотах: 10,85; 18,7 і 37 ГГц), товщини льоду, глибини снігу і вологості ґрунту ((6,9 – 7,3) ГГц, (89 – 91) ГГц). Перший КА серії WSF-M запущено на орбіту у квітні 2024 р., запуск другого заплановано на 2028 р.

З погляду задач ДЗЗ мікрохвильові поляризаційні вимірювання дають змогу: вимірювати одночасно швидкість і напрям вітру над океаном, виділяти поляризоване випромінювання морської поверхні на тлі слабополяризованого випромінювання хмар та опадів; визначати вологість ґрунту та зони опадів над суходолом; вимірювати параметри спектра морського хвилювання в гравітаційно-капілярній області.

Переважає більшість мікрохвильових радіометрів, запущених на орбіту до теперішнього часу, являють собою конічні скануючі радіометри [4]. Інструментом нового класу став прилад MIRAS на борту КА ESA SMOS (2009 р.). Це інтерферометричний радіометр, який працює на низькій для подібних приладів частоті 1,413 ГГц, що дає змогу вимірювати солоність морської води, а також глибше проникати в товщу морського льоду для визначення його згуртованості. Використання нижчої частоти призвело б до збільшення розміру наземного сліду (footprint) і до погіршення просторової роздільної здатності. Тому під час опрацювання даних SMOS використовувався метод синтезованої апертури, що дало змогу домогтися просторової роздільної здатності 50 км – не гірше, ніж у більш високочастотних радіометрів.

Ще одним проєктом мікрохвильового радіометра із синтезом апертури став GeoSTAR, розроблений Лабораторією реактивного руху NASA (JPL) [6]. За своєю просторовою роздільною здатністю він близький до радіометра AMSU, яким у 1990-х – 2010-х рр. оснащувалися низькоорбітальні супутники NOAA. При цьому GeoSTAR передбачалося розмістити на геостационарній

орбіті. Це дало б змогу проводити вимірювання кожні 15 хв, що вкрай важливо для досліджень швидкоплинних явищ. Було виготовлено наземний прототип приладу. Запуск планувався в 2014 р. на борту супутника NOAA GOES, але не був здійснений. Проекти інтерферометричних радіометрів пропонувалися й пізніше, але так і не були реалізовані [7]. Загалом, цей напрямок розвивається досить повільно.

Сучасні мікрохвильові радіометри виконують широкосмугові вимірювання: ширина смуги становить, як правило, (50 – 500) МГц на канал. Груба спектральна інформація не дає змоги виділити вузькі лінії поглинання молекул і розділити близькі фізичні ефекти (наприклад, водяну пару і хмари на близьких частотах). Тому одним із напрямів удосконалення мікрохвильових радіометрів є створення гіперспектральних приладів, що забезпечують ширину смуги – (1 – 10) МГц на канал. Кількість каналів при цьому може сягати кількох сотень.

У 2021 р. японська компанія Elecs Industry розробила гіперспектральний мікрохвильовий радіометр DSμRAD (Direct RF Sampling Hyperspectral Microwave Radiometer), здатний приймати мікрохвильове випромінювання від L- до Ka-діапазону – від 512 МГц до 41,472 ГГц із кроком 13,5 МГц. Маса приладу становить 30 кг [8, 9].

Завдяки широкому діапазону частот і здатності виявляти переривчасті сигнали, що змінюються в часі, DSμRAD може використовуватися у сфері безпеки. Так, JAXA і Elecs Industry провели наземний демонстраційний експеримент з виявлення браконьєрських суден шляхом перехоплення сигналів корабельних радарів [8].

У [10] описано проєкт гіперспектрального мікрохвильового радіометра HyMS (Hyperspectral Microwave Sensing), який використовує сотні вузькосмугових каналів, розподілених по широкій миттєвій смузі частот (ширина – 4 ГГц). Представлено результати повітряних експериментів із приладом, виконаних у грудні 2022 року. HyMS досліджує особливості молекулярного поглинання в атмосфері, пов'язані з O₂, з центром на частотах 54,3 ГГц і 66,6 ГГц і водяною парою H₂O з центром на частоті 183,311 ГГц. Радіометр виконаний у малому форм-факторі, придатному для розгортання на угрупованні малих КА, з потенціалом забезпечення високого просторово-часового покриття планети. Роботи над радіометром веде компанія Spire Global UK (британський підрозділ американської Spire Global), за підтримки британської RAL Space і американської JCR Systems.

Гіперспектральний мікрохвильовий радіометр High Spectral Resolution Airborne Microwave Sounder (HiSRAMS) розроблено компанією Omnisys Instruments AB, Національною дослідницькою радою Канади (NRC) та Університетом Макгілла за спонсорської підтримки ESA. Його поява стала можливою завдяки розвитку цифрових поліфазних банків фільтрів зі швидким перетворенням Фур'є. Прототип HiSRAMS для можливих майбутніх супутникових місій вимірює випромінювання в кисневому діапазоні ((49,6 – 58,3) ГГц) і діапазоні водяної пари ((175,9 – 184,6) ГГц), і наразі проходить випробування на борту авіаційної платформи [11].

Мікрохвильові радіометри використовують як допоміжні прилади під час виконання активних вимірювань із космосу. Так, у 1992 р. було запущено КА Topex/Poseidon для вимірювання рельєфу морської поверхні за допомогою радарного альтиметра. Для корекції затримки поширення радарного сигналу крізь тропосферу (через водяну пару) на борту КА було встановлено

мікрохвильовий радіометр. Згодом це призвело до створення цілого сімейства висотомірів-радіометрів, які розроблялися з кінця 1990-х рр. до теперішнього часу для місії Jason. Зв'язку радіометра й альтиметра використовують також на супутниках ESA Sentinel-3. У KA NISAR, спільному проєкті США та Індії, запуск якого намічено на 2025 р., також передбачається використовувати радіометр для корекції сигналу радара.

Значних успіхів досягнуто в галузі створення радіометрів для використання на малих КА. Так, JPL розробила компактний векторний радіометр COWVR (Compact Ocean Wind Vector Radiometer), що забезпечує вимірювання швидкості та напрямку вітру над поверхнею океанів Землі [12]. З 2022 р. прилад працює на борту Міжнародної космічної станції (МКС).

У 2018 р. з борту МКС було запущено КА TEMPEST-D, реалізований у форм-факторі CubeSat 6U [13]. Мініатюрний мікрохвильовий радіометр TEMPEST, розроблений JPL, призначений для спостереження за тропічними циклонами та інтенсивними опадами. Прилад працює на п'яти каналах, від 89 ГГц до 182 ГГц, і вміщується в об'ємі CubeSat 4U (20 см х 20 см х 10 см). Він здатний визначати яскраву температуру з точністю, кращою за 1 К, перебуваючи на орбіті висотою 400 км.

Супутникове угруповання NASA TROPICS (Time-Resolved Observations of Precipitation structure and storm Intensity with a Constellation of Smallsats) складається з чотирьох CubeSat 3U, кожен з яких оснащений 12-канальним мікрохвильовим радіометром. TROPICS забезпечує зйомку в діапазонах 91 ГГц і 205 ГГц, зондування температури в діапазоні 118 ГГц і зондування вологості в діапазоні 183 ГГц. Просторова роздільна здатність у надирі становить близько 27 км для температури і 17 км для вологості та опадів, а ширина смуги огляду становить близько 2000 км. Середній час повторного відвідування становить близько 1 години. Основна мета місії TROPICS – пов'язати структуру температури, вологості та опадів з еволюцією інтенсивності тропічних циклонів. Радіометр розроблено в Лабораторії Лінкольна – науково-дослідній установі Міністерства оборони США в структурі Массачусетського технологічного інституту (МТІ).

Мікрохвильові радіометри вже працюють на низці малих комерційних метеосупутників. Так, метеосупутники компанії Tomorrow.io (США) оснащені 12-канальними радіометрами Passive Microwave Sounder. Прилади виготовлені за технологією, переданою компанії Лабораторією Лінкольна МТІ [14]. Наразі на орбіті перебувають 7 із 18-ти супутників Tomorrow, які мають форм-фактор CubeSat 6U.

Ще одна американська компанія, PlanetiQ, планує оснастити мікрохвильовими радіометрами свої метеосупутники GNOMES 13–18, які мають форм-фактор CubeSat 6U.

Порівняно невеликі габарити, маса й енергоспоживання радіометрів роблять можливим розміщення цих приладів на борту малих комерційних КА ДЗЗ. При цьому дані мікрохвильових радіометрів затребувані в низці галузей економіки. Наприклад, у сільському господарстві, де вони дають змогу оцінити вологість ґрунту на великих територіях. Однак основним стимулом до появи мікрохвильових радіометрів на борту малих КА став інтерес, проявлений військовими США до даних угруповань малих комерційних метеосупутників, і передача компаніям-розробникам таких угруповань конверсійних мікрохвильових радіометрів. Зазначимо, що китайські малі

комерційні метеосупутники, як правило, використовують для вимірювань сигнали наявних глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Найближчими роками в стадію тестування на орбіті, ймовірно, перейдуть проекти гіперспектральних радіометрів, оскільки вони також становлять інтерес для розв'язання завдань національної безпеки і оборони.

Альтиметрія. Альтиметр спрямовує короткий імпульс сигналу радара в надир і, за різницею в часі між випусканням і прийомом сигналу, дає змогу визначити відстань до поверхні. По суті, мікрохвильова альтиметрія використовує той самий базовий принцип, що й лідарна зйомка [1].

Мікрохвильова супутникова альтиметрія забезпечує глобальні, часті й точні вимірювання висоти рівня моря і великих внутрішніх водойм. Дані, отримані супутниковими альтиметрами, використовують у різних галузях геодезії, океанографії, гляціології, дослідження клімату, атмосфери, вітру, хвиль, біології та навігації [15].

Технологію розробили наприкінці 1960-х рр. Одним із перших супутників, що використовував альтиметр для вимірювання висоти поверхні океану, став GEOS-3 (Geodetic Earth Orbiting Satellite), запущений NASA в 1975 р. У 1978 р. було запущено спеціалізований супутник для вивчення океану, Seasat (США), також оснащений мікрохвильовим альтиметром. З 1990-х рр. безперервне спостереження за висотою поверхні океану за допомогою альтиметрів здійснюється ланцюжком місій TOPEX/Poseidon, Jason, Sentinel-3/SRAL і Sentinel-6 та ін.

Більшість сучасних альтиметрів використовують реальну апертуру і мають низьку просторову роздільну здатність. Застосування альтиметрів із SAR, таких як Sentinel-3/SRAL, дало змогу значно поліпшити просторову роздільну здатність – до 300 м уздовж траєкторії. Режим роботи SAR забезпечує більш точні вимірювання висоти в прибережних зонах і внутрішніх водоймах [16].

В альтиметрі ALtiKa на супутнику SARAL, спільному проєкті Індії (ISRO) і Франції (CNES), для підвищення просторової роздільної здатності використано вищу частоту. Прилад працював у Ка-діапазоні (35,75 ГГц), що дало змогу проводити високоточні вимірювання висоти поверхні океану. Запущений у 2013 р. SARAL з масою близько 400 кг є прикладом компактного супутника, який успішно виконував завдання з альтиметрії.

Останніми роками активно використовують двочастотні альтиметри (Ku- і C-діапазони), у яких одну з частот використовують для корекції іоносферних спотворень. До таких альтиметрів належать, зокрема, SRAL на супутниках ESA Sentinel-3, і RA китайських супутників HY-2 (Haiyang-2).

Альтиметри застосовують у складі місій, що комбінують різні методи спостереження. Разом із радіометрами і скатерометрами (наприклад, на супутниках Jason і Sentinel), альтиметри використовують для одночасного вимірювання висоти, швидкості вітру і вологості, що покращує моделі океанічних течій і клімату.

Прикладом місії, що комбінує різні методи спостережень за участю альтиметра, є також американо-французький супутник SWOT (Surface Water and Ocean Topography), запущений на орбіту в грудні 2022 р. Він призначений для збору високодетальних даних про висоту поверхні води. SWOT обладнаний радаром, що працює в режимі інтерферометра, і альтиметром, що дає змогу створювати двовимірні карти висоти водної поверхні, включно з річками та озерами. Супутник використовує дві антени,

що працюють у парі (інтерферометр Ка-діапазону), що дає змогу вимірювати не тільки висоту, а й нахил водної поверхні (ширина смуги ~ 120 км) з роздільною здатністю 50 м, проти (1 – 2) км у класичних альтиметрів.

Розвиток технологій HTS (High Throughput Satellites) і компактних антен (наприклад, з апертурою 0,6 м у Ка-діапазоні) дає змогу створювати дешевші та легші альтиметри, які підходять для малих супутників стандарту CubeSat [17].

Скатерометрія. Скатерометри – це активні прилади ДЗЗ, які вимірюють відбитий від поверхні Землі сигнал (зазвичай від морської поверхні) для визначення швидкості та напрямку приповерхневого вітру, а також інших параметрів, як-от вологість ґрунту або стан льодового покриву. Їхня робота заснована на тому, що вітри, які рухаються над морем, впливають на шорохуватість морської поверхні і, таким чином, змінюють коефіцієнт зворотного розсіювання цієї поверхні. Посилаючи мікрохвильові імпульси, скатерометр приймає відбиті від морської поверхні сигнали і за їхньою інтенсивністю визначає ступінь хвилювання (сильно збурена вітром морська поверхня сильніше розсіює випромінений приладом імпульс).

Першим космічним скатерометром став SASS, встановлений на борту супутника Seasat (США, 1978 р.). SASS сканував земну поверхню по обидва боки від наземної траси супутника за допомогою двох незалежних антен, спрямованих під кутом 45° (передній промінь) і 135° (задній промінь). Кути падіння радіолокаційних променів варіювалися від 25° до 55° . SASS використовував мікрохвильовий Ku-діапазон із довжиною хвилі 2,1 см (частота 14,599 ГГц).

Прилад Active Microwave Instrument (AMI) на борту супутників ESA ERS-1/2 (1991 р./1995 р.) поєднував у собі функції SAR і вітрового скатерометра (Wind Scatterometer, WSC). Він міг працювати в трьох режимах: режимі зйомки, режимі спостереження хвиль і режимі спостереження вітру. AMI функціонував у С-діапазоні (частота 5,3 ГГц, довжина хвилі 5,66 см).

Недоліком двопроменевого скатерометра SASS була неоднозначність визначення швидкості та напрямку вітру. Для розв'язання цієї проблеми в конструкцію AMI було введено третій промінь, орієнтований під кутом 90° градусів до напрямку польоту. Ця конфігурація виявилася дуже ефективною і застосовується досі. Її використовували в скатерометрах ASCAT (Advanced SCATterometer), що літали на європейських метеосупутниках Metop [18], і використовують у скатерометрах SCA у другому поколінні європейських метеосупутників Metop-SG.

Сучасні скатерометри, як правило, працюють у Ku- або С-діапазонах, забезпечуючи високу радіометричну, але низьку просторову роздільну здатність. Останнє зумовлено тим, що більшість скатерометрів є радаром з реальною апертурою. Так, роздільна здатність скатерометра SCA становить 25 км ((15 – 20) км у режимі високої роздільної здатності).

Для підвищення просторової роздільної здатності скатерометрів використовують спеціальні методи обробки зображень. Завдяки використанню методу Scatterometer Image Reconstruction вдалося підвищити просторову роздільну здатність даних скатерометра OSCAT індійського КА SCATSat-1 з 25 км до 2,2 км [19].

Низка перспективних проєктів переосмислює досвід AMI, об'єднуючи можливості скатерометрів і SAR, даючи змогу одночасно працювати в обох режимах [20]. Це дає змогу поліпшити просторову і часову роздільну

здатність під час моніторингу вітру і морської поверхні. SAR забезпечує більш високу просторову роздільну здатність під час оцінювання вітрового поля поблизу берегів, скаттерометр дає більш широке охоплення далеко від берегів. Подібна інтеграція особливо корисна в регіонах зі складною структурою вітру, таких як системи апвеллінгу.

У проєкті SeaSTAR розглядають можливість створення трипроменевого скаттерометра, що використовує техніку радарної інтерферометрії із синтезованою апертурою. За рахунок цього передбачається досягти високої для приладів цього класу просторової роздільної здатності – близько 1 км [21].

Крім традиційного використання для вимірювання вітрів над океанами, скаттерометри також застосовуються для моніторингу суші (вологість ґрунту, біомаса), а також для вивчення кріосфери (морський лід, сніговий покрив) [22].

Радарна зйомка. Між оптичною і радарною зйомкою є кілька суттєвих відмінностей.

Оскільки радар є активним датчиком, він не потребує сонячного освітлення, і зйомка може здійснюватися як у денний, так і в нічний період.

На відміну від оптичних датчиків, які зазвичай спрямовані в надир, радари спрямовані в бік від траси супутника. У результаті радарні знімки потребують складніших процедур геометричної корекції.

Хмарність не чинить істотного впливу на поширення радарного сигналу в низькій діапазоні мікрохвильового випромінювання – такі дані не потребують атмосферної корекції. У короткохвильових діапазонах (Ka-, Ku- та ін.) на радарні знімки можуть впливати гідрометеори.

Дані радарної зйомки чутливі по відношенню до опадів, що випали у вигляді дощу і роси. Так, радарні дані, отримані в сезон дощів, серйозно недооцінюють площу знеліснення, оскільки ділянки вирубок і непорушеного лісу мають близькі значення зворотного розсіювання.

Нарешті, випромінювання радара є когерентним, тобто передається з точним набором довжин хвиль. Це дає змогу проводити вимірювання не тільки амплітуди, а й фази відбитих хвиль, а також використовувати поляризацію. Когерентність радарів дає змогу використовувати нові методи вимірювань, недоступні пасивним оптичним датчикам.

Основне призначення радарної зйомки – вирішення завдань всепогодного цілодобового моніторингу. Так, супутникові радари дають змогу вести спостереження льодової обстановки в арктичних широтах в умовах полярної ночі та стежити за вирубкою тропічних лісів, незважаючи на щільну хмарність [23, 24]. Космічну радарну зйомку активно використовують у завданнях оборони та розвідки.

Перші радари, радянські КА серії УС-А, з'явилися в космосі на початку 1970-х рр., у рамках випробувань системи морської космічної розвідки і цілевказівки. Через низьку орбіту (висота близько 270 км), обрану для оптимальної роботи радара, і велике енергоспоживання останнього, живлення бортових систем супутників здійснювалося ядерною енергетичною установкою.

Американські КА радарної розвідки Lacrosse (перший апарат серії було запущено 1988 р.) забезпечували роздільну здатність, за деякими повідомленнями, від 0,6 до 3 м. КА Lacrosse-1 масою (14 – 16) т мав циліндричний корпус, до якого прикріплювалися панелі сонячних батарей і

великогабаритна параболічна антена. Вартість такого КА перевищувала 1 млрд. доларів. Загалом було запущено 5 КА Lacrosse. Останній запуск відбувся у 2005 р.

За останні десять років значного поширення для надвисокодетальної зйомки земної поверхні, насамперед спрямованої на розв'язання військових і розвідувальних завдань, набули мініатюрні радарні супутники компаній Capella Space, Umbra (обидві – США) і ICEYE (Фінляндія–США). Це КА масою кілька десятків кілограмів, оснащені радаром Х-діапазону (довжина хвилі 3 см).

Енергетичні можливості малих супутників дають змогу вести зйомку лише на невеликій частці витка орбіти. Так, система електроживлення КА ICEYE забезпечує час роботи радара на витку орбіти – до 150 с із приблизно півторагодинної тривалості витка. Висока частота зйомки заданої ділянки досягається створенням орбітальних угруповань. Зокрема, супутникове угруповання ICEYE налічує понад 30 КА, Umbra – 5 КА, Capella Space – 4 КА.

Максимальна просторова роздільна здатність даних, отриманих подібними супутниками, сягає 25 см. КА здатні здійснювати інтерферометричні вимірювання для побудови цифрових моделей рельєфу та визначення зсувів земної поверхні. Крім того, супутники ICEYE здатні знімати короткі відеоролики.

У пасивному режимі антена радара може бути використана для радіорозвідки – виявлення об'єктів за характерним для них радіовипромінюванням. У такій якості застосовуються КА Umbra.

Метод радарної інтерферометрії, використовуючи різниці фаз відбитих сигналів, прийнятих двома зміщеними в просторі антенами, дає змогу одержувати інформацію про рельєф місцевості та його зміни, оцінювати зміщення земної поверхні й будувати цифрові моделі поверхні (ЦМП).

Розрізняють два різновиди інтерферометричної зйомки. Перший заснований на використанні двоантенного радарного інтерферометра з жорсткою базою, орієнтованою перпендикулярно лінії шляху. У 2000 р. за допомогою подібного інтерферометра SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), розміщеного на борту шатла Endeavour, було отримано дані ЦМП Землі з просторовою роздільною здатністю 30 м. Очолювало проєкт Національне агентство геопросторової розвідки США.

Інтерферометр SRTM складався з радарної системи С-діапазону (довжина хвилі 5,6 см), одна антена якої була розташована у відсіку корисного навантаження шаттла, а інша – на кінці 60-метрової мачти. Остання висувалася з відсіку корисного навантаження, коли шаттл перебував у космосі.

Друга технологія інтерферометричної зйомки використовує дані, отримані одним радаром під час знімання із сусідніх орбіт або двома радаром, що переміщуються по близьких орбітах. Останнім способом, за допомогою пари німецьких радарних супутників TerraSAR-X і TanDEM-X, у період (2011 – 2015) рр. було зібрано дані для Copernicus DEM – глобальної ЦМП, побудованої у 2019 р.

Сигнали Х-діапазону, в якому працюють радары TerraSAR-X і TanDEM-X, розсіюються у верхньому шарі рослинного покриву. У результаті, до висоти земної поверхні в ЦМП додається висота деревної рослинності. Тому логічною виглядала поява у 2016 р. проєкту тандемного польоту космічних

радарів L-діапазону (довжина хвилі 23,6 см) – TanDEM-L (ФРН). Сигнали цього діапазону добре проникають крізь густу рослинність, даючи змогу отримувати інформацію про підстилаючу поверхню.

Незважаючи на свою актуальність, проєкт TanDEM-L все ще не реалізовано. Водночас Китай запустив на початку 2022 р. тандем радарних супутників Lutan-1A/1B, оснащених радаром L-діапазону. Метою місії є отримання глобальної ЦМП у масштабі 1:50000 і моделі деформації земної поверхні з міліметровою точністю, особливо в хмарних і дощових регіонах планети біля екватора. Розробником супутників є Китайська академія космічних технологій (CAST), що входить до складу Китайської аерокосмічної науково-технічної корпорації (CASC).

Застосування інтерферометричної зйомки не обмежується тандемними польотами. У березні 2023 р. китайська компанія Zhuzhou Space Interstellar Satellite Technology почала розгортання на орбіті угруповання PIESAT (Hongtu) з 16 малих радарних супутників X-діапазону. Чотири перших КА PIESAT розміщено на орбіті у формі колеса: роль ступиці відіграє центральний супутник PIESAT-1 A01, а «спицями» є допоміжні апарати PIESAT-1 B01–B03. Основне призначення угруповання – картографування та визначення зсувів земної поверхні.

Сучасні ЦМП за даними космічних спостережень створюються впродовж місяців або навіть років. Водночас військові та розвідувальні цілі вимагають створення оперативних тривимірних карт. Щоб вирішити це завдання, компанія Arga Labs (США) розробляє угруповання з 24-х малих радарних супутників, призначених для одночасної зйомки однієї й тієї самої ділянки поверхні з кількох ракурсів. Початок розгортання угруповання заплановано на 2026 р.

Наразі найбільше за чисельністю угруповання державних і приватних радарних супутників має Китай. У ньому представлені основні діапазони роботи радарів (X, C, L), а також присутня низка унікальних систем.

Китайський супутник Ludi Tance-4-01 (запущений у серпні 2023 р.) є єдиним радарним супутником, виведеним на похилу геостационарну орбіту. Максимальна роздільна здатність радара (L-діапазону), імовірно, становить 20 м. Наявність радара на похилій геостационарній орбіті дає можливість вести практично безперервне спостереження на великій території.

Паралельно в Китаї розвивається теорія обробки даних бістатичних систем геостационарного і наземного радарів. Такі системи використовують космічний радар як джерело сигналу, а наземний радар – для приймання прямого сигналу із супутника і відбитого сигналу від поверхні Землі. Через складну геометричну конфігурацію системи, що змінюється в часі, для неї не підходять традиційні методи створення радарних зображень. У 2024 р. група китайських учених продемонструвала метод побудови зображень пари геостационарного і наземного радарів [25].

Космічна радарна зйомка освоює нові діапазони частот. Так, пара китайських радарних супутників AIRSAT 01/02 (Zhongke 01/02) оснащених радаром Ku-діапазону (довжина хвилі 2,1 см) з максимальною роздільною здатністю менше 1 м. КА дають змогу здійснювати радарну інтерферометрію в Ku-діапазоні і, можливо, є першим у світі подібним угрупованням.

Кц-діапазон – найкороткохвильовіший діапазон із тих, на яких працюють сучасні супутникові радари. Дощ і дощові хмари впливають на відбиття

радарного сигналу в цьому діапазоні сильніше, ніж у більш довгохвильових діапазонах. З іншого боку, зростає і потенційна роздільна здатність.

Відомо, що в Кц-діапазоні працює радарний супутник Taijing 4-03 (запущений 23 січня 2024 р.), розроблений і виготовлений приватною китайською компанією Minospace [26]. КА виконаний у «плоскій» конфігурації, розрахований на пакетний запуск для розгортання багатосупутникового орбітального угруповання. Маса КА становить 230 кг. Радар забезпечує зйомку із субметровою просторовою роздільною здатністю за ширини смуги понад 10 км. Характерно, що одним із перших опублікованих знімків Taijing 4-03 став знімок військово-морської бази США «Норфолк».

29 квітня 2025 р. було виведено на орбіту супутник ESA Biomass із радаром Р-діапазону (довжина хвилі 70 см). Метою місії Biomass є вимірювання біомаси лісів для оцінки запасів і потоків вуглецю в атмосфері для кращого розуміння вуглецевого циклу.

Радар Biomass забезпечує просторову роздільну здатність 60 м (поперек траси) x 50 м (уздовж траси). Ширина смуги захоплення в режимі Stripmap становить близько 50 км. Цикл інтерферометричної зйомки повторюється кожні 17 діб. Маса КА становить 1170 кг (зокрема 67 кг палива), а його розміри: 10 м x 12 м x 20 м (включно з антеною).

Розробку місії вели компанії Airbus Defence and Space UK, L3Harris і Thales Alenia Space, починаючи з 2016 р., а її вартість оцінюють у 400 млн. євро.

Антени супутникових радарів сконструйовані таким чином, щоб посылати і приймати електромагнітні хвилі з чітко визначеною поляризацією. Сигнали радара під час передавання і приймання можуть бути поляризовані у вертикальному (V) або в горизонтальному (H) напрямку. Можливі чотири різні комбінації поляризації (перша – передача, друга – приймання): VV, VH, HH і HV.

Змінюючи поляризацію сигналу, що передається, і отримуючи кілька різних поляризованих зображень від однієї і тієї ж серії імпульсів, радарні системи збирають інформацію про те, як об'єкти земної поверхні реагують на поляризоване випромінювання, що падає. Такий метод спостереження називається радарною поляриметрією.

Залежність поляризаційного стану радарного сигналу від механізму зворотного розсіювання радіохвиль об'єктами на земній поверхні дає змогу ідентифікувати різноманітні об'єкти, виявити їхню структуру, орієнтацію та умови навколишнього середовища. Галузі застосування радарної поляриметрії включають сільське господарство, лісівництво, геологію, гідрологію, океанографію, дослідження прибережних зон океанів і реагування на стихійні лиха.

Найдетальнішу інформацію про об'єкти поверхні дають радарні системи, що працюють у всіх чотирьох варіантах поляризації [27]. Однак робота в цьому режимі (так званий «повний поляризації») висуває високі вимоги до радарної системи. Такий радар повинен передавати імпульси з частотою вдвічі більшою, ніж радар, що забезпечує одну або дві комбінації поляризацій (наприклад, VV і VH), оскільки передавальна поляризація повинна чергуватися між H і V імпульсом за імпульсом.

Радарні поляриметричні вимірювання з космосу почали виконувати в середині 1990-х рр. (SIR-C/X, США).

Методи забезпечення поляриметричного режиму роботи радару постійно вдосконалюються. Так, сучасні радари – японський PALSAR-2 на супутнику ALOS-2 і канадський RADARSAT Constellation Mission – використовують так звану компактну поляриметричну архітектуру [28].

Спільний проєкт США та Індії, КА NISAR (NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar), запуск якого заплановано на 2025 р., має стати першим супутником, що використовує для зйомки радари одразу двох діапазонів – S і L. За супутникову платформу, радар S-діапазону (10 см) і запуск КА відповідає індійська сторона, радар L-діапазону (24 см) створено в NASA. Місія спрямована на вимірювання змін на поверхні нашої планети, насамперед, вимірювання зміщень поверхні з сантиметровою точністю.

Активно досліджуються питання створення мультистатичних радарних систем, що базуються на угрупованнях малих супутників [29]. Метою формування таких систем є досягнення високої азимутальної роздільної здатності при збереженні великої ширини смуги огляду. При цьому можуть бути досягнуті переваги в плані надійності, гнучкості та зниження вартості. Відомо, що формації краще підходять для радарів низьких частот, тоді як для високих частот простіше використовувати угруповання незалежних супутників [30].

Мультистатичні системи являють собою перспективний підхід до розширення наявних радарних систем. Так, місія Harmony, яку передбачається запустити за програмою ESA Earth Explorer у 2029 р., являє собою пару радарних супутників С-діапазону, які працюють тільки на приймання в конфігурувальній формації з КА Sentinel-1 як передавачем. Створене таким чином угруповання зможе проводити унікальні вимірювання невеликих зсувів земної поверхні на часових масштабах від десятків мілісекунд (для вимірювання океанічних течій) до років (для вимірювання руху твердої поверхні суші).

Незважаючи на десятиліття досліджень, об'єднання або «злиття» радарних і оптичних знімків залишається невирішеною проблемою. Радари й оптичні датчики використовують різні механізми формування зображень, унаслідок чого виходять знімки з різними неоднорідними характеристиками. Об'єднання даних цих двох датчиків дало б змогу підвищити якість наявних і майбутніх додатків ДЗЗ. У статті [31] розглядається сучасний стан і останні тенденції розвитку методів «злиття» радарних і оптичних даних ДЗЗ.

Перспективні технології. Важливою проблемою методів ДЗЗ у мікрохвильовому діапазоні є обмеження сучасної вузькосмугової мікрохвильової електроніки – вона не дає змоги налаштовувати параметри сенсорів у широкому діапазоні спектра [32]. Наприклад, для вивчення таких взаємопов'язаних характеристик, як кількість опадів, що випали, і вологість ґрунту, необхідні окремі супутникові радари, що працюють у різних діапазонах. Це істотно обмежує можливості вивчення динамічно пов'язаних процесів у земній системі. Щоб мати можливість вимірювати одночасно (або через короткий проміжок часу) кілька характеристик, необхідний радар широкого спектра. Необхідна радарна система, здатна переналаштовуватися, і яка не залежить від конкретного діапазону мікрохвильової електроніки.

В якості сенсорів для такої системи в [32] пропонується використовувати атомні датчики Рідберга. Це високочутливі квантові детектори широкого спектра, які можна налаштовувати для роботи з хвилями від мікро- до міліметрового діапазону.

Датчики Рідберга ґрунтуються на використанні рідбергівських атомів – воднеподібних атомів і атомів лужних металів, у яких зовнішній електрон перебуває у високозбудженому стані (аж до рівнів порядку 1000). Розмір рідбергівського атома може перевищувати розмір того ж самого атома, що перебуває в основному стані, майже в 106 разів.

Рідбергівські атоми мають кілька специфічних властивостей, зокрема підвищену реакцію на електричні та магнітні поля. Ці властивості дають змогу використовувати їх як сенсори надслабких електромагнітних полів.

У [32] представлено метод дистанційного визначення вологості ґрунту за допомогою наземної радарної рефлектометрії на основі атомних датчиків Рідберга і запропоновано шлях до створення систем мікрохвильового дистанційного зондування в широкому діапазоні.

Висновки. У найближчі кілька років мікрохвильові радіометри, ймовірно, будуть масово представлені в складі апаратури американських угруповань малих комерційних метеосупутників. Цьому сприяють замовлення з боку американських урядових організацій, а також передача компаніям-розробникам супутників конверсійних технологій створення радіометрів.

Найближчими роками в стадію тестування на орбіті можуть перейти гіперспектральні мікрохвильові радіометри, які також становлять інтерес для вирішення завдань національної безпеки і оборони.

Водночас порівняно невеликі габарити, маса й енергоспоживання мікрохвильових радіометрів, а також затребуваність отриманих ними даних у різних галузях економіки, сприятиме появі цих приладів на борту малих комерційних КА ДЗЗ.

Розміщення радарних альтиметрів і скаттерометрів на борту малих КА наразі технічно можливе, але не затребуване потенційними замовниками.

Сучасні альтиметри і скаттерометри призначені насамперед для оглядових спостережень за поверхнею океану. Водойми, які можна досліджувати з їхньою допомогою, повинні мати значну площу. Такого обмеження немає у методів рефлектометрії та скаттерометрії, що використовують сигнали наявних ГНСС. Наразі точність результатів, отриманих цими методами, істотно нижча, ніж у традиційних радарних альтиметрів і скаттерометрів, але вона постійно зростає. Тому в майбутньому можна очікувати спільного використання зазначених методів альтиметрії та скаттерометрії.

Застосування альтиметрів і скаттерометрів на малих КА ДЗЗ у перспективі може бути пов'язане з потребами військової метеорології, необхідністю поліпшення якості прогнозів погоди на морських театрах військових дій.

Космічна зйомка за допомогою радарів із синтезованою апертурою є напрямом мікрохвильового ДЗЗ, який найактивніше розвивається.

Доведеним фактом можна вважати заміну одиночних великогабаритних розвідувальних супутників, що ведуть спостереження за допомогою радарів, на великі угруповання малих КА. У зв'язку з цим особливий інтерес представляє побудова оперативних ЦМП – новий напрямок застосування радарних даних у найближчому майбутньому.

Перехід на більш високочастинні діапазони зйомки, що вимальовується в деяких китайських компаніях, дасть змогу домогтися більш високої просторової роздільної здатності з меншими витратами. З іншого боку, при використанні низькочастотних діапазонів існують перспективні напрямки

використання мультистатичних радарних систем, що спираються на угруповання малих КА.

1. Пироженко О. О., Храмов Д. О. Оптичні методи дистанційного зондування Землі та перспективи їх використання в комерційних космічних апаратах. Технічна механіка. 2024. № 4. С. 17–30. <https://doi.org/10.15407/itm2024.04.017>
2. Spencer R. W., Christy J. R. Precision Lower Stratospheric Temperature Monitoring with the MSU: Technique, Validation, and Results 1979–1991. Journal of Climate. 1993. 6 (6). P. 1194–1204. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1194:plstmw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1194:plstmw>2.0.co;2)
3. Hollinger J. P., Peirce J. L., Poe G. A. SSM/I instrument evaluation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1990. 28 (5). P. 781–790. <https://doi.org/10.1109/36.58964>
4. Encyclopedia of Remote Sensing / ed. E. G. Njoku. New York, Springer-Verlag, 2014.
5. Gaier, P. W. et al. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. 42 (11). P. 2347–2361. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2004.836867>
6. Lambrigtsen B. et al. Getting the GeoSTAR instrument concept ready for a space mission, 2011. URL: https://esto.nasa.gov/conferences/estf2011/presentations/Lambrigtsen_ESTF2011.pdf (дата звернення: 04.07.2025).
7. Ramos-Perez I. et al. PAU-SA: A Synthetic Aperture Interferometric Radiometer Test Bed for Potential Improvements in Future Missions. Sensors. 2012. 12 (6). P. 7738–7777. <https://doi.org/10.3390/s120607738>
8. Maeda T. et al. Direct RF Sampling Hyperspectral Microwave Radiometer (DSμRAD) for Ground Use. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2021. 18 (6). P. 1084–1088. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2020.2990707>
9. Maeda T., Kawaguchi N., Tomii N. Demonstration of Ultrawideband Hyperspectral Microwave Interferometer by True Time Delay. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. 19. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2020.3023697>
10. Henry M. et al. Development of a Hyperspectral Microwave Sounder for Enhanced Weather Forecasting. IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2023. P. 1092–1095. <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282436>
11. Liu L. et al. Radiative closure tests of collocated hyperspectral microwave and infrared radiometers. Atmospheric Measurement Techniques. 2024. № 17. P. 2219–2233. <https://doi.org/10.5194/amt-17-2219-2024>
12. Brown S. et al. Demonstrating a low-cost sustainable passive microwave sensor architecture: The Compact Ocean Wind Vector Radiometer Mission. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. P. 5561–5564. <https://doi.org/10.1109/igarss.2016.7730452>
13. Padmanabhan S. et al. TEMPEST-D Radiometer: Instrument Description and Prelaunch Calibration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. P. 1–14.
14. Foy K. Lincoln Laboratory honored for technology transfer of hurricane-tracking satellites. URL: <https://www.ll.mit.edu/news/lincoln-laboratory-honored-technology-transfer-hurricane-tracking-satellites> (дата звернення: 04.07.2025).
15. Yang L. et al. Satellite Altimetry: Achievements and Future Trends by a Scientometrics Analysis. Remote Sensing. 2022. 14. P. 3332. <https://doi.org/10.3390/rs14143332>
16. Rosmorduc V. et al. The first 25 years of altimetry outreach. Advances in Space Research, 2021. 68 (2). P. 1225–1241. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.026>
17. Srinivasan M., Tsontos V. Satellite Altimetry for Ocean and Coastal Applications: A Review. Remote Sensing. 2023. 15 (16). P. 3939. <https://doi.org/10.3390/rs15163939>
18. Gelsthorpe R. V., Schied E., Wilson J. J. W. ASCAT – Metop’s Advanced Scatterometer. 2000. URL: <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet102/Gelsthorpe102.pdf> (дата звернення: 04.07.2025).
19. SCATSAT-1 Level 4 Data Products Format Document. 2017. URL: https://mosdac.gov.in/docs/scatsat_level4_dataproducts.pdf (дата звернення: 04.07.2025).
20. Li H. et al. Design of a New Sensor Integrating Scatterometer and SAR to Observe Sea Surface Wind Field. 2021 CIE International Conference on Radar (Radar). 2021. P. 2990–2993. <https://doi.org/10.1109/Radar53847.2021.10028170>
21. Martin A. C. H. et al. Performance of the Earth Explorer 11 SeaSTAR Mission Candidate for Simultaneous Retrieval of Total Surface Current and Wind Vectors. Remote Sensing, 2024. 16 (19). P. 3556. <https://doi.org/10.3390/rs16193556>
22. Frison P. L., Jarlan L., Mougin E. Using Satellite Scatterometers to Monitor Continental Surfaces. Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology. 2016. P. 79–113. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-104-8.50003-6>
23. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J. Remote Sensing and Image Interpretation (7th edition), Wiley, 2015.
24. SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation / eds. Flores A. et al. NASA. 2019. URL: <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/2674/sar-handbook-comprehensive-methodologies-for-forest-monitoring-and-biomass-estimation> (дата звернення: 04.07.2025).
25. Ti J. et al. A Novel SAR Imaging Method for GEO Satellite–Ground Bistatic SAR System with Severe Azimuth Spectrum Aliasing and 2-D Spatial Variability. Remote Sensing. 2024. 16 (15). P. 2853. <https://doi.org/10.3390/rs16152853>
26. Yan W. et al. Design and On-Orbit Performance of Ku-Band Phased-Array Synthetic-Aperture Radar Payload System. Sensors. 2024. 24 (20). P. 6741. <https://doi.org/10.3390/s24206741>
27. Yang R. et al. Polarimetric Microwave Imaging. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8897-6>

28. *Fan Q. et al.* Ship Detection Using a Fully Convolutional Network with Compact Polarimetric SAR Images. *Remote Sensing*. 2019. 11 (18). P. 2171. <https://doi.org/10.3390/rs11182171>
29. *Paek S. et al.* Small-Satellite Synthetic Aperture Radar for Continuous Global Biospheric Monitoring: A Review. *Remote Sensing*. 2020. 12 (16). P. 2546. <https://doi.org/10.3390/rs12162546>
30. *Guccione P. et al.* Along-Track Multistatic Synthetic Aperture Radar Formations of Minisatellites. *Remote Sensing*. 2020. 12 (1). P. 124. <https://doi.org/10.3390/rs12010124>
31. *Sommervold O., Gazzee M., Arghandeh R.* A Survey on SAR and Optical Satellite Image Registration. *Remote Sensing*. 2023. 15 (3), 850. <https://doi.org/10.3390/rs15030850>
32. *Arumugam D. et al.* Remote sensing of soil moisture using Rydberg atoms and satellite signals of opportunity. *Scientific Reports*. 2024. 14 (1). 18025. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68914-6>

Отримано 12.07.2025,
в остаточному варіанті 30.09.2025