

¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: kukhtar3088@gmail.com

² Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

³ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: oleksandr.s.zaiats@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>

ДОСВІД РОЗГОРТАННЯ НАЗЕМНИХ КУТОВИХ ВІДБИВАЧІВ ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

Мета цієї роботи – аналіз ефективності розгортання наземних куткових відбивачів різних розмірів та конструкцій для проведення радіолокаційного моніторингу супутником Sentinel-1. **Методика.** Точність визначення просторових рухів поверхні методом InSAR у місцях розгортання куткових відбивачів залежить від їхнього розміру, а також співвідношення сигнал – шум на радіолокаційних знімках. Тому під час проєктування положення куткового відбивача попередньо виконано оцінювання інтенсивності зворотного розсіювання вибраної території на радарних знімках. У місцях розгортання наземних куткових відбивачів прагнули забезпечити збільшення зворотного розсіювання не менше ніж на 10 dB. Орієнтування куткових відбивачів виконували на основі даних про параметри орбіти супутника Sentinel-1, отриманих із вебресурсу Heavens Above. Зміни рівня інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках оцінювали із застосуванням онлайн-платформи EO Browser. **Результати.** Досліджено ефективність розгортання та моніторингу тригранних трикутних куткових відбивачів розміром 0,5 м та 1 м. Результати досліджень дали змогу узагальнити досвід розгортання тимчасових куткових відбивачів та використати його під час проєктування конструкцій відбивачів для постійного моніторингу засобами радіолокаційного зондування. Максимальна автономність та постійне значення ефективної площі розсіювання трикутного куткового відбивача забезпечено завдяки обладнаному захисному екрану, що перешкоджає потраплянню атмосферних опадів всередину відбивача. На відміну від тригранних куткових відбивачів, які зорієнтовані на висхідну або низхідну орбіту супутника, круговий чотиригранний кутковий відбивач забезпечує підвищення інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках, зроблених із різних орбіт та різними супутниками. Круговий чотиригранний відбивач, який було розгорнуто для постійного моніторингу, характеризується як універсальний відбивач для усіх можливих сенсорів, що виконуватимуть радіолокаційне знімання. Наукова новизна та практична значущість полягають у підтвердженні ефективності використання наземних куткових відбивачів для підвищення інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках. Апробовані та удосконалені конструкції відбивачів можуть бути використані під час створення мережі для постійного моніторингу, що дасть змогу забезпечити міліметрову точність визначення просторових рухів земної поверхні та інженерних споруд методом InSAR.

Ключові слова: InSAR; кутковий відбивач; ефективна площа розсіювання; Sentinel-1; EO Browser.

Вступ

Упродовж останнього десятиліття метод супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR) набув широкого застосування як геодезичний інструмент для розв’язання різноманітних задач геотехнічного моніторингу з міліметровою точністю. Такий рівень точності досягається завдяки використанню сенсорів, що забезпечують середню та високу роздільну здатність, а також методики опрацювання часових рядів радіолокаційних знімків (Multi-Temporal SAR). Два найпоширеніші методи опрацювання довгих часових рядів знімків: метод малих базисних

ліній (SBAS) та метод постійних розсіювачів (PSInSAR).

Постановка проблеми. Результатом опрацювання серії радарних знімків методом PSInSAR є часові серії вертикальних рухів земної поверхні лише для пікселів із постійною і достатньо високою амплітудою сигналу. Такі пікселі на зображенні, що домінують посеред інших, називаються постійними розсіювачами. Встановлено, що кількість постійних розсіювачів на знімках забудованої території може досягати кількох сотень на квадратний кілометр, тоді як на незабудованих територіях постійних розсію-

вачів набагато менше або зовсім немає [Huang and Zebker, 2019].

Відсутність штучних або природних об'єктів, що забезпечують високу інтенсивність зворотного розсіювання, можна компенсувати встановленням пасивних наземних кутових відбивачів. Завдяки властивості забезпечувати потужне зворотне розсіювання та зберігати стабільне положення кутові відбивачі застосовують як когерентні наземні цілі для здійснення геодинамічного моніторингу методом InSAR. Особливо актуальним є використання кутових відбивачів на територіях, для яких передбачається довготривалий моніторинг супутниковими радіолокаційними методами. Тому, щоб забезпечити надійні результати радіолокаційного моніторингу земної поверхні та інфраструктурних об'єктів, необхідно встановлювати наземні кутові відбивачі.

Форми відбивачів. Для радіолокаційного моніторингу застосовують кутові відбивачі різної форми та конструкції [Doerry, 2014]. Але найпоширенішою формою, яка забезпечує ефективне відображення сигналу, є пасивний відбивач з трьома ортогональними площинами. Тригранний відбивач допускає більші похибки його орієнтування порівняно з іншими формами відбивачів. У [Doerry and Brock, 2012; Garthwaite, 2017] зазначено, що орієнтування відбивача з точністю до 4° за азимутом та у вертикальній площині не створює істотного впливу на рівень зворотного розсіювання. Форма граней відбивача впливає на величину його ефективної площі розсіювання. Ефективна площа розсіювання (*англ. Radar Cross-Section, RCS*) – це характеристика відбивної здатності цілі, що визначається відношенням потужності відображеної електромагнітної хвилі до тієї, яка падає. На практиці застосовують тригранні трикутні, прямокутні та п'ятикутні відбивачі. Незважаючи на те, що ефективна площа розсіювання трикутного тригранного відбивача (кутового відбивача) є найменшою, його використовують найчастіше. Це пов'язано з його конструктивною жорсткістю та відносною простотою у виготовленні.

Розміри відбивачів визначаються довжиною внутрішніх ортогональних ребер. Відомо про застосування кутових відбивачів розміром від 0,33 м [Dheenathayalan et al., 2017; Kelevitz et al., 2022] до 5 м [Schwerdt et al., 2018]. Відбивачі

великих розмірів зазвичай використовують для радіометричного калібрування радару супутників. Найчастіше застосовують відбивачі розміром 1–2 м. Під час проєктування наземних кутових відбивачів прагнуть забезпечити необхідний рівень ефективної площі розсіювання у заданій точці радіолокаційного знімку. Ця величина прямо пропорційна до розміру кутового відбивача й обернено пропорційна до довжини хвилі радару супутника [Collilieux et al., 2020].

Наприклад, для досягнення теоретичної точності визначення вертикальних рухів до 1 мм методом InSAR в С-діапазоні ($\lambda = 5,5466$ см) необхідно забезпечити збільшення значення ефективної площі розсіювання відбивача на 30 dB [Bányai et al., 2020]. Отже, для практичних застосувань радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1 (С-діапазон), необхідний розмір трикутного кутового відбивача повинен бути в межах 0,8–1,7 м [Garthwaite, 2017; Ferretti, 2014].

Мета

Мета роботи – аналіз ефективності розгортання наземних кутових відбивачів різних розмірів та конструкцій для здійснення радіолокаційного моніторингу супутником Sentinel-1 із середньою довжиною хвилі С-діапазону.

Методика досліджень

Проєктуючи положення кутового відбивача, рекомендовано попередньо виконати оцінку інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках для досліджуваної території [Struhár et al., 2021]. Вибір місця положення для розгортання кутового відбивача повинен забезпечити збільшення інтенсивності зворотного розсіювання не менше ніж на 10 dB. Це дасть змогу досягти точності вимірювання вертикальних рухів близько 1 мм [Garthwaite, 2017].

Оскільки основне завдання наземного кутового відбивача – відображення надісланої від радару хвилі назад на супутник, для ефективної роботи важливо правильно зорієнтувати його під час встановлення. Для цього визначають ефемериди орбіти супутника, який здійснюватиме знімання: максимальна висота супутника над горизонтом та його азимут у цей момент. Параметри орбіти супутника Sentinel-1A визначали за дани-

ми онлайн-ресурсу Heavens Above (<http://www.heavens-above.com>). Вхідними даними для розрахунку були координати встановлення відбивача, дата проведення спостережень, назва супутника (ідентифікаційний номер Sentinel-1A – 39634). Отримані ефемериди використано для орієнтування відбивача у вертикальній і горизонтальній площинах за методикою, описаною у роботі [Tretyak et al., 2023].

За вказаною методикою здійснено орієнтування усіх кутових відбивачів. Це дало змогу досягти збільшення зворотного розсіювання сигналу на радіолокаційних знімках у місцях їхнього розгортання. Оцінювання рівня інтенсивності зворотного розсіювання можна виконувати безпосередньо на радарних знімках із використанням програмного забезпечення. Однак для цього виду робіт вважаємо за доцільне використовувати EO Browser (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>). Це онлайн-платформа, яка забезпечує доступ до даних дистанційного зондування, зокрема до радіолокаційних даних супутника Sentinel-1. Переваги застосування EO Browser такі: швидкий доступ до даних без необхідності завантажування знімків; можливість використання як на етапі проектування, так і для подальшого моніторингу та оцінювання ефективності кутового відбивача; зручні інструменти ведення статистики зміни зворотного розсіювання для лінійно поляризованих та перехресно-поляризованих даних.

Результати досліджень

У цій роботі наведено описання, методику розгортання та результати моніторингу чотирьох кутових відбивачів. Перші два відбивачі (трикутні кутові відбивачі розміром 0,5 м та 1 м) були встановлені тимчасово як дослідні зразки. Із урахуванням отриманого досвіду та відомих результатів досліджень, висвітлених у наукових працях та звітах, сконструйовано два кутові відбивачі для постійного моніторингу: трикутний кутовий відбивач розміром 1 м та круговий чотиригранний кутовий відбивач, розміром 1 м, із гранями у формі чверті кола.

1. Трикутний кутовий відбивач, розміром 0,5 м (рис. 1), виготовлений із листів алюмінію завтовшки 3 мм. Жорстко закріплений до бетонної основи та має механізм регулювання кута нахилу від 0° до 15° .



Рис. 1. Трикутний кутовий відбивач із довжиною ребра 0,5 м

Відбивач був встановлений тимчасово, на період з 17.03.23 р. до 30.09.23 р. Визначені параметри для орієнтування кутового відбивача: азимут 99° ; кут нахилу нижньої грані до горизонту 12° . Так було забезпечено орієнтування на супутник Sentinel-1, який здійснював знімання із низхідної орбіти.

На рис. 2 наведено графік зміни зворотного розсіювання (dB) вертикально поляризованого сигналу супутника Sentinel-1. Графік відображає статистику для точки встановлення відбивача за останні два роки.

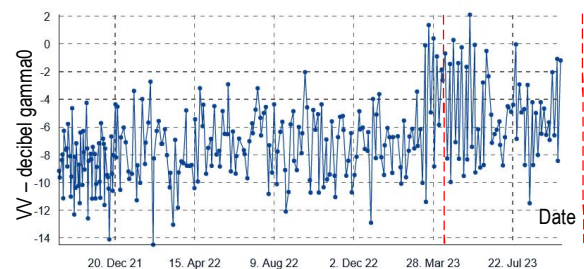


Рис. 2. Часовий ряд інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення кутового відбивача (0,5 м). Проміжок часу на часовій шкалі – два роки (30.09.21–30.09.23 рр.). Період розгортання кутового відбивача (17.03.23–30.09.23 рр.) обмежений червоними пунктирними лініями

Часовий ряд зворотного розсіювання для точки, на якій розгорнуто відбивач, отримано з вебресурсу EO Browser. Тому графік відображає значення зворотного розсіювання із усіх наявних радіолокаційних знімків, отриманих над заданою територією. Різка зміна амплітуди між сусідніми значеннями зумовлена зміною орієнтування ра-

дара супутника на 180° у разі зміни напрямку орбіти (висхідна/низхідна).

На графіку бачимо, що середній рівень зворотного розсіювання близький до -8 dB. Це значення дещо вище за інтенсивність зворотного розсіювання для незабудованої території (-10 ; -15 dB). Це зумовлено наявністю штучних споруд (будівлі, огорожі) на віддалі кількох десятків метрів від місця встановлення цього відбивача.

Наприкінці березня 2023 р. спостерігаємо збільшення інтенсивності зворотного розсіювання до рівня (-2 ; $+2$ dB), що відповідає періоду розгортання кутового відбивача (17.03.23 р.). Кутовий відбивач невеликого розміру (0,5 м) у поєднанні із достатньо високим фоновим зворотним розсіюванням забезпечив зростання інтенсивності лише на 8 dB. Окрім цього, в період експлуатації відбивача з червня до вересня 2023 р. на графіку спостерігаємо два моменти зниження рівня зворотного розсіювання, пов'язані із періодичним затопленням відбивача після літніх дощів.

Досвід використання цього відбивача дав змогу зробити певні висновки. Листовий алюміній завтовшки 3 мм забезпечує необхідну жорсткість конструкції відбивача та зберігає його геометричні параметри. Невелика маса виробу, корозійна стійкість та доступна ціна свідчать на користь використання алюмінію. Незважаючи на компактні габарити відбивача розміром 0,5 м, який зручно використовувати на інженерних об'єктах та спорудах, він не створює достатнього рівня підвищення зворотного розсіювання на знімках. Однак ідею використання компактних відбивачів не варто відкидати. Великі розміри відбивача можна компенсувати більшою кількістю малих відбивачів, організувавши їх у масив зручної конфігурації [Kelevitz et al., 2022]. Дуже важливо забезпечити систему, що запобігатиме затопленню кутового відбивача. За її відсутності відбивач щоразу буде наповнюватись водою або снігом, що різко знижує ефективність його роботи. Найпростіший варіант організації такої системи – створення дренажу у вигляді перфорацій нижньої грані відбивача [Garthwaite et al., 2015].

2. Трикутний кутовий відбивач, розміром 1 м (рис. 3), виготовлений з листів оцинкованої сталі завтовшки 0,55 мм. Був встановлений тимчасово, для здійснення додаткових досліджень, на 17.03.2023–1.07.2023 рр.



Рис. 3. Трикутний кутовий відбивач з довжиною ребра 1,0 м

Відбивач був розміщений за кілька десятків метрів від попередньо описаного відбивача. Тому параметри орієнтування на супутник Sentinel-1, який виконував знімання з низхідної орбіти, були ті самі (азимут 99° ; кут нахилу 12°). На рис. 4 подано графік зміни інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення відбивача за два роки (15.07.2021–15.07.2023 рр.)

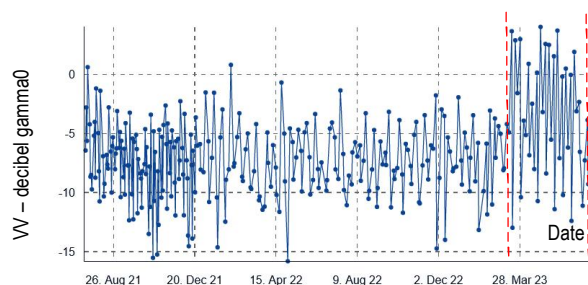


Рис. 4. Часовий ряд інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення кутового відбивача (1,0 м). Проміжок часу на часовій шкалі – два роки (15.07.21–15.07.23 рр.). Період розгортання кутового відбивача (17.03.23–01.07.23 рр.) обмежений червоними пунктирними лініями

Середнє значення зворотного розсіювання за досліджуваний період становить -8 dB. На графіку чітко видно період встановлення кутового відбивача, який забезпечив підвищення інтенсивності до $+4$ dB. Досягнута інтенсивність зворотного розсіювання є хорошим показником для кутового відбивача розміром 1 м, але за середнього фонового значення розсіювання -8 dB може бути недостатнім для забезпечення необ-

хідної точності визначення вертикальних рухів методом InSAR. Отримані дані є прикладом необхідності попередньої оцінки рівня зворотного розсіювання території на етапі проєктування положення відбивача.

Досвід використання цього відбивача підтвердив можливість реалізації конструкції з оцинкованого металу завтовшки 0,55 мм. Виникають і додаткові роботи зі створення каркасу, який забезпечить необхідні геометричні параметри. Як і для попереднього відбивача, зберігається необхідність дренажної системи.

3. Трикутний кутовий відбивач, розміром 1,0 м, для постійного використання (рис. 5) виготовлений з урахуванням попередньо отриманого досвіду. Матеріал – листовий алюміній, завтовшки 3 мм; ребра додатково посилені алюмінієвими кутниками. Відбивач закріплено нерухомо на бетонній подушці. Особливістю цього кутового відбивача є наявність захисного екрана з оргскла, який повністю закриває робочу грань відбивача (спрямовану на супутник) та запобігає потраплянню всередину дощової води, снігу, бруду та сторонніх предметів. Завдяки цьому забезпечується максимальна автономність відбивача.



Рис. 5. Трикутний кутовий відбивач з довжиною ребра 1,0 м та захисним екраном, встановлений в м. Бережани

Кутовий відбивач розгорнуто 10.10.2023 р. на території бази практики Інституту геодезії Львівської політехніки у м. Бережани. Його зорієнтовано в напрямку висхідної орбіти супутника Sentinel-1 для постійного моніторингу території методом InSAR. Наявність на будівлі навчального корпусу GNSS станції забезпечить додаткові дані для інтерпретації результатів радіолокаційного моніторингу. На рис. 6 подано графік зміни

інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення відбивача за два роки (13.11.2021–13.11.2023 рр.)

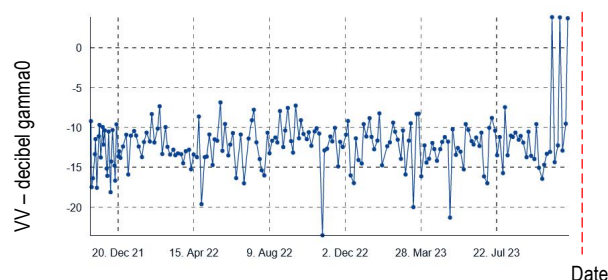


Рис. 6. Часовий ряд інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення кутового відбивача (1,0 м) в м. Бережани. Проміжок часу на часовій шкалі – два роки (13.11.21–13.11.23 рр.). Дата розгортання кутового відбивача (10.10.23 рр.) позначена червоною пунктирною лінією

Перед встановленням відбивача на постійне місце попередньо проаналізовано рівень зворотного розсіювання на цій території. Відсутність поблизу місця встановлення споруд або інших об'єктів забезпечила низький рівень інтенсивності зворотного розсіювання. Згідно із даними за останні два роки (рис. 6), середній рівень зворотного розсіювання становив -13 dB. Після розгортання кутового відбивача 10.10.2023 р. значення інтенсивності збільшилось до $+3,7$ dB. На графіку бачимо не лише впевнене зростання інтенсивності зворотного розсіювання на 15 dB, але й стабільність цих значень на послідовних знімках. Очікується, що завдяки захисному екрану ці значення і надалі залишатимуться стабільно високими.

4. Кутові тригранні відбивачі, які складаються із трьох площин простої форми (трикутник, прямокутник, чверть круга), можна об'єднувати у складніші конфігурації. Такі відбивачі поєднують два, чотири, вісім і більше тригранних відбивачів задля збільшення ефективної площі розсіювання та покращення його "видимості" з різних напрямків.

Круговий чотиригранний кутовий відбивач (рис. 7) сконструйований як універсальний відбивач для усіх можливих сенсорів, які здійснюватимуть радіолокаційне знімання. На відміну від тригранних кутових відбивачів, які зорієнтовані на висхідну або низхідну орбіту супутника, круговий чотиригранний відбивач забезпечує підвищення інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках, зроблених з різних орбіт та різними супутниками.



Рис. 7. Круговий чотиригранний кутовий відбивач з довжиною ребра 1,0 м, встановлений на дамбі Тербле-Ріцької ГЕС: а – вигляд 1; б – вигляд 2

Цей відбивач поєднує чотири тригранні відбивачі з площинами у формі чверті круга. Він виготовлений з листового алюмінію завтовшки 3 мм та додатково посилений алюмінієвими кутниками. Довжина внутрішнього ребра відбивача становить 1 м. Для зниження вітрового опору відбивача у вертикальних гранях виконано перфорації. Діаметр отворів підібрано згідно із рекомендаціями [Garthwaite et al., 2015] і становить 5 мм, що не перевищує 1/6 довжини радіолокаційної хвилі Х-діапазону (30 мм).

Круговий чотирикутний кутовий відбивач був встановлений на дамбі Тербле-Ріцької ГЕС 15.07.2023 р. для ведення постійного радіолокаційного моніторингу. На рис. 8 наведено графік зміни інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення відбивача впродовж одного року (15.11.2022–15.11.2023 рр.)

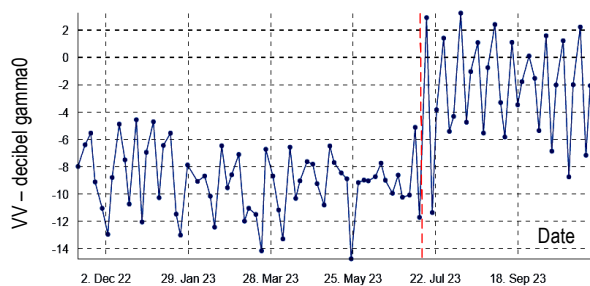


Рис. 8. Часовий ряд інтенсивності зворотного розсіювання у місці встановлення кругового чотиригранного кутового відбивача (1,0 м) на дамбі Тербле-Ріцької ГЕС. Проміжок часу на часовій шкалі – один рік (15.11.22–15.11.23 рр.). Дату розгортання кутового відбивача (15.07.23 рр.) позначено червоною пунктирною лінією

Відмінності кругового чотиригранного відбивача за конструкцією від традиційних кутових відбивачів позначаються на результатах інтенсивності зворотного розсіювання у місці його розгортання. З графіка бачимо, що після встановлення кругового відбивача інтенсивність зворотного розсіювання збільшилась на усіх радіолокаційних знімках. Це пояснюється ефективним відбиттям сигналу на усі супутники, які виконують радіолокаційне знімання над цією територією. У результаті розгортання відбивача на дамбі ГЕС інтенсивність зворотного розсіювання, яка була в діапазоні (-14; -4 dB), зростає і змінюється у межах (-8; +2 dB). Максимальне значення досягає 3,2 dB.

Круговий відбивач має плоску нижню грань, закріплену до горизонтальної основи, тому така конструкція не наповнюється дощовою водою. Щоб уникнути задування снігом, передбачено встановлення на відбивач захисного купола.

Наукова новизна та практична значущість

Викладені результати підтверджують ефективність використання наземних кутових відбивачів для підвищення інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках. Апробовані та удосконалені конструкції відбивачів можна використовувати під час створення мережі для постійного моніторингу. Це дасть змогу забезпечити міліметрову точність визначення просторових рухів земної поверхні та інженерних споруд методом InSAR.

Висновки

На відміну від природних відбивачів радіолокаційного сигналу, штучні наземні кутові відбивачі можна цілеспрямовано встановлювати у місцях, для яких необхідна інформація про просторові переміщення.

Встановлено, що трикутний тригранний кутовий відбивач розміром 1 м впевнено забезпечує збільшення інтенсивності зворотного розсіювання на 10 dB. Згідно із теорією, це дасть змогу досягти точності визначення вертикальних переміщень 1 мм методом InSAR. Такі теоретичні розрахунки потребують експериментальних досліджень на основі довготривалого моніторингу відбивачів, що і буде предметом подальших досліджень.

Автономність відбивача такої конструкції легко забезпечити, змонтувавши захисний екран, який перешкоджає потраплянню води, снігу та бруду всередину кутового відбивача.

Застосування кутового відбивача розміром 0,5 м не забезпечує необхідного рівня підвищення інтенсивності зворотного розсіювання. Проте масив із кількох компактних відбивачів можна ефективно використовувати в умовах з обмеженою площею, наприклад, на інженерних об'єктах та спорудах.

Практично підтверджено, що круговий чотиригранний кутовий відбивач – це універсальний інструмент для збільшення інтенсивності звор-

тного розсіювання, в точці його розгортання, для максимальної кількості сенсорів, які виконують радіолокаційне знімання із різних орбіт.

Література

- Bányai, L., Nagy, L., Hooper, A., Bozsó, I., Szűcs, E. and Westergom, V. (2020). Investigation of Integrated Twin Corner Reflectors Designed for 3D InSAR Applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 17, No. 6, 1013–1016. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2939675>.
- Collilieux, X., Courde, C., Fruneau, B., Aimar, M., Schmidt, G., Delprat, I., Pesce, D., and Wöppelmann, G. (2020). Radar Corner Reflector installation at the OCA geodetic Observatory (France). *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-5201, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5201>.
- Dheenathayalan, P., Caro Cuenca, M., Hoogetboom, P. and Hanssen, R. F. (2017). Small Reflectors for Ground Motion Monitoring With InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 12, 6703–6712. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2731424>.
- Doerry, A. W. (2014). Reflectors for SAR performance testing-second edition. United States. <https://doi.org/10.2172/1204079>.
- Doerry, A. W., Brock, B. C. (2012). A better trihedral corner reflector for low grazing angles. *Proc. SPIE 8361, Radar Sensor Technology XVI*, 83611B, 8 May 2012. <https://doi.org/10.1117/12.918105>
- Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring From Space*. Houten, The Netherlands: EAGE. 159 p. <https://doi.org/10.3997/9789462820036>
- Garthwaite, M. C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J. H., Lawrie, S. (2015). The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. *Record*, 2015/03. Geoscience Australia, Canberra. <http://dx.doi.org/10.11636/Record.2015.003>
- Garthwaite, M. C. (2017). On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR. *Remote Sensing* 9, No. 7: 648. <https://doi.org/10.3390/rs9070648>.
- Huang, S. and Zebker, H. A. (2019). Persistent Scatterer Density by Image Resolution and Terrain Type. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 12, No. 7, 2069–2079. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2896038>
- Kelevitz, K., Wright, T. J., Hooper, A. J. and Selvakumaran, S. (2022). Novel Corner-Reflector Array Application in Essential Infrastructure Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

- Sensing*, Vol. 60, 1–18. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3196699>.
- Schwerdt, M., Schmidt, K., Klenk, P., Tous Ramon, N., Rudolf, D., Raab, S., Weidenhaupt, K., Reimann, J., Zink, M. (2018). Radiometric Performance of the TerraSAR-X Mission over More Than Ten Years of Operation. *Remote Sensing*. 10(5):754. <https://doi.org/10.3390/rs10050754>
- Struhár, J., Kačmařík, M., Hlaváčová, I., Lazecky, M., Rapant, P. (2021). Testing Polygon for Simulated Vertical Displacement Measurements based on Co-located InSAR Corner Reflector and GNSS Station. *GeoScience Engineering*, Vol. 67, No. 4. 156–167 <https://doi.org/10.35180/gse-2021-0061>
- Tretyak, K., Kukhtar, D., Prykhodko, M., Yatsyk, V. (2023). Deployment Technique of Radar Corner Reflector for SAR Observations. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2022"*, 2–4 October 2023, Lviv, Ukraine.

Denys KUKHTAR^{1*}, Volodymyr HLOTOV², Oleksandr ZAYATS³

¹ Department of Higher geodesy and astronomy, Lviv polytechnic National university, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: kukhtar3088@gmail.com

² Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv polytechnic National university, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

³ Department of Engineering Geodesy, Lviv polytechnic National university, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

EXPERIENCE IN DEPLOYING RADAR CORNER REFLECTORS FOR INSAR MONITORING

The aim of this work – analysis of the effectiveness of deployment of ground corner reflectors of various sizes and designs for radar monitoring by the Sentinel-1 satellite. Method. The accuracy of determining the spatial movements of the surface by the InSAR method in the places where the corner reflectors are deployed depends on their size, as well as the signal-to-clutter ratio on the radar images. Therefore, when designing the position of the corner reflector, an assessment of the backscattering intensity of the selected area on radar images was previously performed. In places where ground corner reflectors are deployed, they tried to ensure an increase in backscatter by at least 10 dB. The orientation of the corner reflectors was performed on the basis of data on the parameters of the Sentinel-1 satellite orbit, which were obtained from the Heavens Above web resource. The assessment of the change in the intensity of backscatter on radar images was carried out using the online platform EO Browser. Results. The effectiveness of deployment and monitoring of trihedral triangular corner reflectors measuring 0.5 m and 1 m was studied. The research results made it possible to generalize the experience of deploying temporary corner reflectors and use it to design reflector structures for permanent monitoring by means of radar sounding. The maximum autonomy and constant value of the effective scattering area of the triangular corner reflector is ensured thanks to the equipped protective screen that prevents atmospheric precipitation from entering the reflector. Unlike three-sided corner reflectors, which are oriented to the ascending or descending orbit of the satellite, the circular four-sided corner reflector provides an increase in the intensity of backscatter on radar images taken from different orbits and different satellites. The circular quadrilateral reflector, which was deployed for continuous monitoring, is characterized as a universal reflector for all possible sensors that will conduct radar imaging. Scientific novelty and practical significance are in the confirmation of the effectiveness of the use of ground corner reflectors to increase the intensity of backscattering on radar images. Tested and improved designs of reflectors can be used when creating a network for constant monitoring, which will ensure millimeter accuracy of determining the spatial movements of the earth's surface and engineering structures by the InSAR method.

Key words: InSAR; corner reflector; radar cross section; Sentinel-1; EO Browser.

Надійшла 15.10.2023 р.