

УДК 528.02:621.396.969

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ОСНОВІ ДАНИХ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ

Світлана Нестеренко

Кафедра автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36000, +38(050)2681792, e-mail: NesterenkoS2208@gmail.com

Досліджено можливості застосування супутникової радіолокації для геодезичного моніторингу деформацій земної поверхні. Опрацьовано різні ресурси отримання космічних знімків, вибрано вебплатформи, з яких можна завантажувати радарні знімки для геодезичних цілей. Проаналізовані методи й інструменти інтерферометричної обробки даних та побудови карт зміщень земної поверхні, зокрема InSAR постійного розсіювача (PS), серій малих базових ліній BAseline (SBAS), які реалізуються на основі багатофункціонального модуля SARscape в ПЗ ArcGis або QGIS; метод, що базується на обробці даних Sentinel-1 в ПЗ SNAP (Sentinel Application Platform); метод SqueeSAR®.

Ключові слова: супутникова радіолокація; методи інтерферометричної обробки; деформація земної поверхні; радарна інтерферометрія; радарні дані; моніторинг.

Вступ

Земна поверхня постійно перебуває в динамічному русі. Фактори, які можуть впливати на геодезичні процеси рухів земної кори і зміщення ґрунтових мас, різноманітні: планетарного масштабу (рухи полюсів Землі, переміщення обертання Землі, викликаних впливом сил притягання Місяця і Сонця, нерівності її обертання [Третяк, 2015] тощо), регіонального (землетруси, варіації геофізичних полів в межах однієї тектонічної плити або щита), локального або місцевого характеру, коли вертикальні й горизонтальні зміни положення мережі точок спричинені геологічними і гідрологічними умовами, особливостями районування, зокрема наявністю техногенно-навантажених територій, гідрометереологічними чинниками.

Моніторинг деформацій земної поверхні локального характеру здійснювався традиційними наземними геодезичними методами. З появою високоточних електронних й роботизованих теодолітів, тахеометрів і нівелірів, лазерних сканерів, знімальних камер та стереофотограмметричних приладів наземне геодезичне знімання зазнало значної трансформації. А з розвитком глобальних навіга-

ційних супутникових систем [Нестеренко, 2021] з'явився новий метод – наземно-супутникове знімання, проведення топографо-геодезичних вимірів за допомогою GNSS-приймачів.

Такі ресурси дають змогу з високою точністю визначати геодезичні параметри, а спільне опрацювання різних методів спостережень дають можливість створення комплексних систем моніторингу деформацій земної поверхні.

Постановка проблеми

Донедавна доступ до отримання даних дистанційного зондування був обмежений, використання космічних зображень для точного позиціонування було можливе лише для військових структур, великих компаній та окремих наукових установ. У сучасному світі маємо технологічні можливості отримання матеріалів оперативного знімання з різною просторовою розрізненістю – від 0,3 до 30 м [Довгий, 2020]. Супутникові знімки можна використовувати для виконання різних тематичних завдань – дослідження природних ресурсів, здійснення збалансованого керування цими ресурсами, виявлення природоохоронних та екологічних порушень [Бурштинська, 2019], а в геодезичних цілях методом супутникової радіолокації можна здійснювати моніторинг за зрушеннями земної поверхні.

Мета – дослідження методів радіолокаційних спостережень за деформаціями земної поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасне наукове дослідження у сфері природничих наук важко уявити без застосування даних дистанційного зондування, а також опрацювання за допомогою ГІС. Оскільки об'єкт дослідження можна вивчати в динаміці, то за останні кілька років це зумовило не тільки наочність, але й можливість отримати нову інформацію в результаті аналізу даних.

Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів ДКАУ, Об'єднання інноваційно-космічних кластерів України здійснюють моніторинг і просторовий аналіз деформацій земної поверхні методами радіолокаційних досліджень PS і SBAS з обробкою вертикальних зміщень за допомогою SARscape в геоінформаційних системах ArcGis або QGIS. Результати можливостей використання радарних інтерферометричних методів були досліджені в працях К. О. Бурака, В. М. Ковтуна, Л. І. Дороша, А. Mouratidis, F. Costantini, X. Chen, G. Tessari, M. Fabris, V. Achilli, A. Ferrerri, A. Фумагаллі, Ф. Новалі, К. Праті, Ф. Рокка, А. Руччі та інших.

Виклад основного матеріалу

Метод досліджень деформацій земної поверхні за допомогою супутникової радіолокації базується

на використанні космічних знімків з КА Sentinel-1, Level-1 Ground Range Detected (GRD), зібрані в режимі Interferometric Wide swath (IW). GRD – дані SAR, які були виявлені, відтворені та спроектовані на наземний простір за допомогою моделі еліпсоїда Землі. Еліпсоїдна проекція GRD коригується з урахуванням висоти місцевості. Для режиму IW багатоступенева обробка виконується для кожної серії окремо. Пакети у всіх підсмугах плавно об'єднуються, щоб утворити єдине суцільне зображення, яке виявлене наземним діапазоном для кожного поляризаційного каналу.

Супутники Synthetic Aperture Radar (SAR) отримують зображення поверхні Землі, випромінюючи електромагнітні хвилі і аналізуючи відбиті сигнали. Кожне зображення SAR включає в себе дві основних властивості: фазу і амплітуду. Фаза містить інформацію про відстань від датчика до цілі, яка використовується в інтерферометричних додатках для вимірювання руху поверхні землі у часі. Амплітуда пов'язана з енергією зворотньо розсіяного сигналу і використовується в додатках для відслідковування спеклів/пікселей і виявлення змін ґрунту. Наземне обладнання не потрібне. Супутники SAR виявляють ціль, яка вже існує на землі (наприклад, будівлі, лінійні споруди, скельні виходи, необроблювані землі, сміття тощо) і реєструють їх відбиті сигнали. Метод вимірювання – радарна інтерферометрія (InSAR), що використовує різницю фаз між двома комплексними радіолокаційними спостереженнями SAR однієї і тієї ж території, з дещо різних позицій датчиків, і дає інформацію про відстань до рельєфу земної поверхні. Об'єднавши фази цих двох зображень після сумісної реєстрації, можна створити інтерферограму, в якій фаза сильно корелює з топографією місцевості, і можна нанести на карту характер деформації, що відбулася між двома датами збору даних.

Радіолокаційна зйомка не залежить від хмарності і освітленості територій, часу доби. Дозволяє отримати глобальну і локальну інформації про об'єкти, виконати ретроспективну обробку за рахунок використання архівної зйомки, що неможливо зробити традиційними геодезичними методами.

Супутникові дані доступні за допомогою порталів USGS (United States Geological Survey), NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency). Найрозповсюдженіші веб-платформи для відкритого та безкоштовного доступу до радарних знімків Sentinel-1: EO Browser, Copernicus Open Access Hub, Vertex ASF Data Portal, Seamless SAR Archive (SSARA).

Інтерферометрична обробка даних і побудова карт зміщень на основі знімків IW може здійснюватися різними методами й інструментами.

Одним з таких методів є PS (Persistent Scatterers) – метод постійних розсіювачів радарного сигналу. Супутникові знімки отримують радіолокаторами з синтезованою апертурою (PCA). За рахунок використання довгих часових серій зображень ефективно усуваються похибки орбітальних даних і прояви фізико-хімічних процесів, що відбуваються в повітряній оболонці Землі. Даний метод може використовуватися для об'єктів, які демонструють лінійну поведінку і мають стійкі відбивачі (урбанізована територія, шляхопроводи, мости тощо). Інтерферометрична обробка даних методом PS має ряд обмежень: об'єкт дослідження не повинен мати швидких якісних змін у часі; радарні вимірювання неможливо виконувати в зимовий період при наявності снігу та в місцях з рослинністю; вимірювання в місцях зі значними перепадами за короткий проміжок часу неможливо отримати, так як виникає просторова декореляція радарного сигналу, потрібна висока узгодженість для отримання якісних результатів. Результатами обробки радіолокаційних зображень методом PS є тематична цифрова карта. Точність визначення вертикальних зміщень становить 2–4 мм.

Для досліджень вертикальних і горизонтальних деформацій нелінійних об'єктів, площинних поверхонь з областями меншої когерентності та аналізу їх просторово-часових характеристик використовується метод Small Baseline Subsets (SBAS) – метод серій малих базових ліній. Даний метод використовує просторово розподілену когерентність замість орієнтування на окремі точки, як це здійснюється в PS, і зберігає здатність утворювати просторово «щільні» вихідні продукти. Методу SBAS є менш автоматизованим, використовується для визначення просторових зміщень на незабудованих і не вкритих рослинністю територіях з сантиметровою точністю.

Алгоритмічний процес складається з 6 послідовних кроків (рис. 1): 1) Connection Graph – побудова графіків базової лінії та положення часу для відображення співвідношення зображень за допомогою тимчасової та позиційної базової лінії; 2) Interferometric Process – створення інтерферограм для кожної пари знімків; 3) Refinement and Re flattening – пошук розгорнутих фазових помилок, для уточнення є крок вирівнювання знімків по контрольним наземним точкам GCP; 4) Inversion, first step – обчислення залишкової фази та розсіювання для повторного вирівнювання фази; 5) Inversion, second step – усунення впливу атмосферних ефектів; 6) Geocoding – отримання результату вертикальних і горизонтальних зміщень по області.

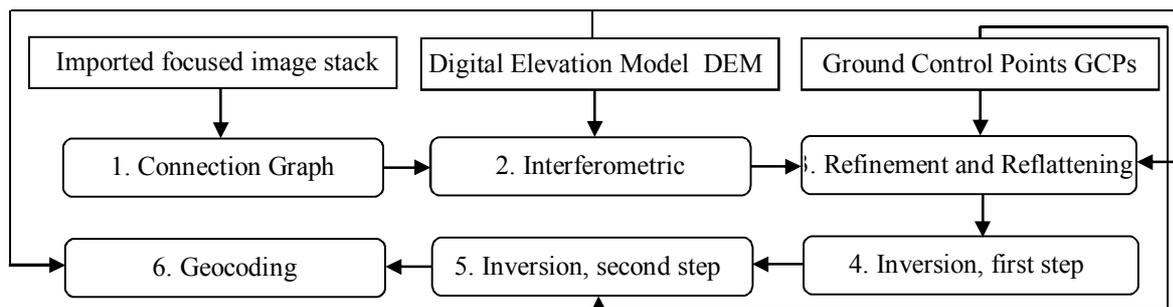


Рис. 1. Алгоритмічний процес обчислення зміщень земної поверхні методом SBAS

Інтерферометрична обробка радарних даних реалізується SARscape – комплексом багатофункціональних модулів для обробки даних радіолокаційної зйомки, виконаної радаром з синтезованою апертурою. Модулі, які забезпечують виконання поставлених завдань: 1) «Interferometry» – дозволяє опрацьовувати інтерферометричні пари радіолокаційних знімків з метою вирішення задач побудови карт зміщення і деформації земної поверхні; 2) «Interferometric Stacking» – дозволяє виконувати вимірювання зміщень і деформацій земної поверхні і споруд з міліметровою точністю за результатами аналізу багатопрохідних ланцюгів радіолокаційних знімків. Аналіз вертикальних зміщень в SARscape виконують в геоінформаційних системах ArcGIS або QGIS.

Ще один метод досліджень деформацій земної поверхні за допомогою супутникової радіолокації базується на обробці даних Sentinel-1 в програмному забезпеченні SNAP (Sentinel Application Platform). Для роботи найчастіше використовуються радарні знімки, завантажені на вебплатформі Copernicus Open Access Hub, яка розроблена Європейським космічним агентством за програмою Copernicus [3]. Програма SNAP також може обробляти знімки, завантажені на Vertex ASF Data Portal і SSARA.

Для автоматизації розрахунків в SNAP застосовуються GPT і bash-скрипти, інтегровані в інформаційну систему хмарних обчислень. Завдання для обробки знімків потрібно прописувати у Graph Builder (Конструктор графів) чотирма послідовними алгоритмами (рис. 2), обираючи необхідні команди: Read (читати) – завантаження знімків; TOPSAR-Split (TOPSAR-розділення) – перший етап обробки, розділення продукту Sentinel-1 на смуги обраних параметрів (swath, поляризація, burst'i); Apply-Orbit-File (застосувати файл орбіти) – оновлення метаданих орбіти; Back-Geocoding (зворотне геокодування) – перетворення координат GNSS у геометричні параметри із знаходженням місцезнаходження об'єкту; Enhanced-

Spectral-Diversity (покращене спектральне розрізнення) – оцінка постійного азимутального зсуву між радіолокаційними зображеннями, усунення розривів фаз у сплесках; Interferogram (інтерферограма) – об'єднання фаз двох зображень, створення інтерферограми; TOPSAR-Deburst (TOPSAR-вибух) – злиття суміжних підсмуг з однаковою часовою теєю, поляризація продукту «вибуху»; TopoPhaseRemoval (видалення топографічної фази) – видалення різних топографічних відхилень відносно ряду рівномірно розташованих смуг; Multilook (мультиперегляд) – усереднення величин, що зберігаються в сусідніх пікселях зображення, збільшення розмірів пікселів, зменшення роздільної здатності; GoldsteinPhaseFiltering (фазовий фільтр Гольдштейна) – відновлення якості смуг фазового зображення (сигнал/шум) за допомогою спеціалізованого фазового фільтру Гольдштейна; SnapuExport (експорт в SNAPHU) – експорт отриманих продуктів в SNAPHU, додаток, за допомогою якого здійснюється розгортання фази інтерферограми.

Четвертий алгоритмічний крок Phase Unwrapping (розгортання фази) передбачає розгортання відфільтрованої інтерферограми поза SNAP за допомогою додатку SNAPHU. Розгорнуті результати слід інтерпретувати як відносні вертикальні/горизонтальні зміщення між пікселями двох зображень. Оператор експорту Export створить каталог з файлами «Узгодженість», «Згорнута фаза», «Розгорнута фаза», «Файл конфігурації».

Поряд із загальнодоступними супутниковими методами досліджень деформацій земної поверхні є комерційні пропозиції. Передова методика InSAR, запатентована TRE Altamira – компанією групи CLS, опрацьовує супутникові радіолокаційні зображення, щоб представити карти зміщення поверхні. Програмне забезпечення SqueeSAR® використовується для аналізу інформації, отриманої із супутників, щоб забезпечити точне (міліметрове) вимірювання зміщення ґрунту [Ферретті, 2011].

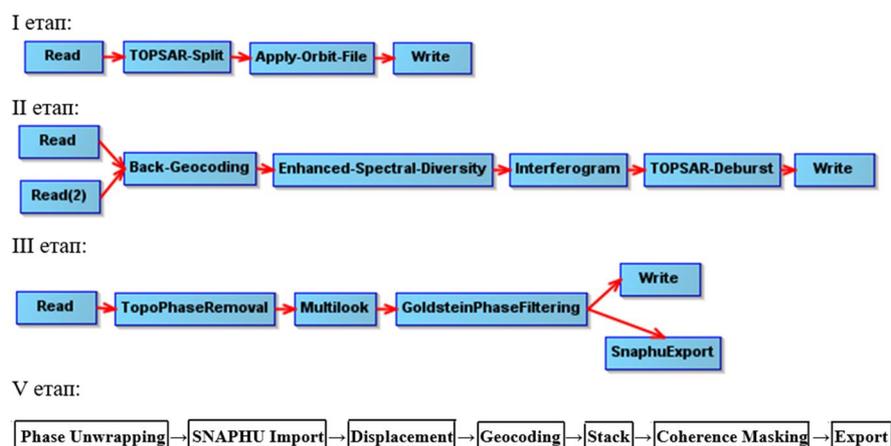


Рис. 2. Алгоритмічний процес обчислення вертикальних зміщень земної поверхні в ПЗ SNAP

Дослідження можна проводити і на поодиноких об'єктах, і на цілих регіонах. Результатом є база точок, що включає: позиції, річний коефіцієнт переміщення, часовий ряд переміщення. Дані доповнюють інші наземні системи моніторингу та методи обстеження.

Використовуючи як фазові, так і амплітудні властивості SAR, TRE Altamira розробила різні методи визначення зміщень поверхні й отримання інформації про характеристики і зміни поверхні. Можна здійснювати постійний моніторинг: від щоквартального до щоглижневого з програмою безперервного моніторингу.

Висновки і пропозиції

Сьогодні інноваційні технології – це незамінна складова будь-якої галузі, вони значно підвищують продуктивність, ефективність і точність. Для геодезичного моніторингу супутникова радіолокація – це сучасні новітні можливості виконання спостережень з високою міліметровою точністю навіть в тих місцях, де іншими засобами отримати інформацію неможливо. Ще однією перевагою є безпечність виконання робіт, оскільки відсутня необхідність проведення наземних польових вимірів. Проте найефективнішим використанням радіолокаційних спостережень є у спільному опрацюванні з різними іншими геодезичними методами досліджень шляхом створення комплексних систем моніторингу деформацій земної поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бурштинська Х. В. Фотограмметрія та дистанційне зондування / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич, Ю. В. Денис. – Львів, 2019. – 212 с.
- Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах / [Довгий С. О., Бабійчук С. М., Кучма Т. Л. та ін.]. – Київ: Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 268 с.

Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій : монографія / [Третяк К. Р., Максимчук В. Ю., Кугас Р. І. та ін.]. – Львів, 2015. – 420 с.

Українська навігаційна супутникова система: стан і перспективи / [Нестеренко С. В., Єрмоленко Д. А., Шефер О. В., Клепко А. В.] // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, 2021. – Вип. 3 (65). – С. 4-7.

A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR / [Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.] // Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011. – Vol. 49, P. 3460–3470.

METHODS OF RESEARCH OF GROUND SURFACE DEFORMATIONS ON THE BASIS OF SATELLITE RADAR DATA

Svetlana Nesterenko

Possibilities of application of satellite radar for geodetic monitoring of earth surface deformation are investigated. Various resources for obtaining space images have been developed, web platforms have been selected from which radar images can be downloaded for geodetic purposes. Methods and tools of interferometric data processing and construction of earth displacement maps, in particular InSAR permanent diffuser (PS-In), series of small baselines BAseline (SBAS), which are implemented on the basis of multifunctional SARscape module in ArcGis or QGIS software; method based on Sentinel-1 data processing in SNAP (Sentinel Application Platform) software; SqueeSAR® method.

Key words: satellite radar; methods of interferometric processing; deformation of the earth's surface; radar interferometry; radar systems; monitoring