



УДК 528.02:621.396.969

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

НЕСТЕРЕНКО Світлана<sup>1</sup>

### Ключові слова

геодезичний моніторинг, InSAR, інтерферометричні методи, деформація земної поверхні, дистанційне зондування Землі

### Анотація

Проаналізовано використання різних інтерферометричних методів InSAR для визначення деформацій земної поверхні. Визначено переваги та особливості диференціальної інтерферометрії DInSAR і методу постійних розсіювачів радарного сигналу PSInSAR, їх недоліки. Зазначена висока ефективність застосування нових методів дистанційного зондування Землі для геодезичного моніторингу геодинамічних процесів.

Супутникові технології зайняли передові позиції у вирішенні геодезичних задач як прикладного, так і наукового характеру. Сучасні дослідження розвитку геодинамічних явищ здійснюється із застосуванням даних дистанційного зондування Землі, а опрацювання результатів геодезичних вимірів – за допомогою геоінформаційних систем. Дистанційні або аерокосмічні методи можуть бути активними і пасивними. При активному зондуванні використовується вимушене випромінювання об'єктів, ініційоване штучним джерелом спрямованої дії; при пасивному використовується власне, природне відбите або вторинне випромінювання об'єктів на поверхні Землі, обумовлене сонячною активністю [1]. До активних відносять лазерне сканування (LIDAR) та радіолокаційне знімання (Radar), яке в свою чергу поділяється на: радіолокаційне знімання за допомогою системи бічного огляду з реальною антеною (SideLookingAirborneradar – SLAR), радіолокаційне знімання за допомогою системи із синтезованою апертурою антени (Synthetic-Aperture Radar – SAR), інтерферометрію (InSAR) [2].

Метод досліджень деформацій земної поверхні InSAR базується на обробці стереопар супутникових зображень з КА Sentinel-1 з високою роздільною здатністю, зібрані в режимі Interferometric Wide swath (IW). 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.

<sup>1</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, к.т.н., ORCID: 0000-0002-2288-3524, e-mail: nesterenkos2208@gmail.com

Амплітуда пов'язана з енергією зворотньо розсіяного сигналу і використовується в додатках для відслідковування спеклів/пікселей і виявлення змін ґрунту. Супутники SAR виявляють ціль, яка вже існує на землі, і реєструють їх відбиті сигнали. Радарна інтерферометрія InSAR 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 [3].

Для побудови карт зміщень можна використовувати різні методи інтерферометричної обробки даних: диференціальну інтерферометрію DInSAR та метод постійних розсіювачів радарного сигналу PSInSAR. Методи досліджень деформацій земної поверхні за допомогою супутникової радіолокації здійснюються в програмному забезпеченні SNAP (Sentinel Application Platform).

Метод диференціальної інтерферометрії DInSAR застосовується для досліджень деформацій площинних поверхонь з метою виявлення невеликих відносних зміщень або деформацій із набору космічних знімків місцевості з подібною геометрією отримання зображення. За допомогою цього методу можна розрахувати дві інтерферограми і шляхом їх порівняння отримати диференціальну інтерферограму. Якщо змін не відбулося, то диференціальна інтерферограма дорівнює нулю. Диференціальна інтерферограма матиме показник відмінний від нуля у разі зміни коефіцієнта відбиття фази або деформації земної поверхні. Для отримання «чистих» результатів зміщень необхідно коефіцієнт відбиття фази, як шум, виключати з подальших аналізів [4]. Основними сферами застосування є моніторинг землетрусів, вулканів, зсувів та інших поверхневих деформацій, але при моніторингу повільної деформації поверхні, наприклад, просідання окремих точок, вона зазнає впливу часової декореляції, космічної декореляції і атмосферної затримки. Тому для вирішення цієї проблеми в 1999 році з'явилися PSI методи, першим з них був метод інтерферометрії стійких відбивачів (Permanent Scatterer SAR Interferometry – PSInSAR), обґрунтований і запатентований Міланським технічним університетом. Метод постійних розсіювачів радарного сигналу або метод стійких відбивачів PSInSAR є модернізацією диференціальної інтерферометрії DInSAR. Для аналітичних цілей цей метод використовує когерентні радіолокаційні цілі (кутикові відбивачі), які можна чітко розрізнити на всіх зображеннях і які не відрізняються за своїми властивостями. Використовуючи кутикові відбивачі (постійні розсіювачі), можна відфільтрувати атмосферні ефекти та усунути часову й геометричну декореляцію. Недоліком цього методу є втрата безперервності даних, що являють собою набір точок із щільністю, що залежить від форми та покриття поверхні. Таких узгоджених радіолокаційних цілей багато на забудованій території, але їх мало в гірських і на заліснених територіях. Метод PSInSAR використовує багато зображень SAR, мінімум 20-25 знімків, що охоплюють одну і ту ж територію, при цьому атмосферні та орбітальні помилки по суті усунені. Чим більша кількість зображень, тим надійніші результати. Одне із зображень вибирається як основне зображення, інші стають підпорядкованими зображеннями для уточнення інформації на основному зображенні і виправлення помилок. На вибраному об'єкті досліджень вибирають достатню кількість точок, так званих, стійких відбивачів (point-wise permanent scatterers – PS). Це переважно штучні споруди, будівлі, металеві предмети, пілони, антени, відкриті гірські породи, які мають високу відбивну здатність і використовуються в ролі стійких відбивачів радарного сигналу. Результатом проведення аналізу фаз точок стають деформації PS точок. У кінці використовується метод інтерполяції для визначення деформації всієї досліджуваної території.

*Переваги й особливості* методу DInSAR: у регіонах, де деформації важко виміряти класичними наземними геодезичними методами, з невеликою кількістю вимірювань, DInSAR дає просторову картину деформацій суцільних територій; вимірювання здійснюються у діапазоні довжин хвиль радара, що призводить до точності зміщення приблизно в 0,5 см. *Недоліки* даного інтерферометричного методу: DInSAR візуалізує деформацію площин, але має неточності у відображенні зміщень окремих точок; погана когерентність (фазове співвідношення між записами) впливає на послідовність, безперервність і точність спостережень через часову та геометричну декореляцію, результати можна отримати в кількох часових проміжках; диференціальний метод має обмеження, як зміни у відображенні об'єктів чи зон, атмосферні впливи та перешкоди сигналу; неоднозначні результати будуть на територіях з різноманітністю поверхні (поява тіней).

*Переваги й особливості* методу PSInSAR: за допомогою постійних розсіювачів можна реєструвати зміну поверхні окремих точок, які повинні бути не видозмінюватися у часі; визначення вертикального зміщення методом PSInSAR повинно уточнювати результати GNSS-спостережень, які є дуже точними у горизонтальному напрямку та мають щільні вимірювання у часі, ці методи доповнюють один одного; висока просторова щільність даних – до 1000 PS/км.кв, що є перевагою відносно наземних методів, є можливість періодичного повторення вимірювань для великої області спостережень; висока точність отриманих результатів – до 0,1 мм; усуваються небажані атмосферні впливи, менш чутливий до геометрії отримання зображення, є можливість порівнювати знімки з великим часовим діапазоном.

**Висновок.** Інтерферометричні методи InSAR для визначення деформацій земної поверхні – це сучасні новітні можливості виконання спостережень з високою міліметровою точністю навіть в тих місцях, де іншими засобами отримати інформацію неможливо. Для отримання комплексної оцінки території (зрушення цілих пластів ґрунту чи окремих точок об'єктів) доцільно використовувати обидва методи, як взаємодоповнюючі.

## Література

- [1] Дорожинський О., Тукай Р. Фотограмметрія. – Л.: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 332 с.
- [2] Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4220:2003. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 18 с.
- [3] Нестеренко С.В. Методи досліджень деформацій земної поверхні на основі даних супутникової радіолокації. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2022», Львів–Яворів–Брюховичі, Західне геодезичне товариство УТГК, 06–08.04.2022. С. 11–14.
- [4] Oštir, K. Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov višin in premikov zemeljskega površja. Doktorska disertacija. – Univerza v Ljubljani, 2000. – 175 str.

## USE OF INTERFEROMETRIC METHODS FOR DETERMINATION OF EARTHLY DEFORMATIONS

NESTERENKO Svitlana

**Abstract.** The use of various interferometric InSAR methods for determining the deformations of the earth's surface is analyzed. The advantages and features of differential interferometry DInSAR and the method of permanent scatterers of the radar signal PSInSAR, as well as their disadvantages, are determined. The high efficiency of the application of new remote sensing methods for geodetic monitoring of geodynamic processes is noted.

**Keywords:** geodetic monitoring, InSAR, interferometric methods, deformation of the earth's surface, remote sensing of the Earth.