

# SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY AS AN ALTERNATIVE FOR SOME APPLIED GEODESY TASKS

**Yasen T. Prokopov**

*Department Artillery, Air Defense and Communication and Information Systems/NMU "Vasil Levsky",  
Shumen, Bulgaria, jasen\_prokopov@abv.bg*

**Summary:** *The contemporary earth's surface remote sensing equipment development is associated with the application and implementation of new technologies for processing terrestrial and satellite data.*

*The methods and processing of radar images can be used for interferometric measurements of the relief of the earth's surface, cracks mapping and tracking for obtaining images of objects on it and assessments of the processes of its movement in various geological phenomena.*

**Key words:** *interferometry, radar, interferogram, satellite image, monitoring, modeling*

## САТЕЛИТНАТА РАДАРНА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ КАТО АЛТЕРНАТИВА ЗА НЯКОИ ЗАДАЧИ ОТ ПРИЛОЖНАТА ГЕОДЕЗИЯ

**Ясен Тр. Прокопов**

### РЕЗЮМЕ

*Развитието на средствата за дистанционни изследвания на земната повърхност на днешно време е свързано с прилагането и реализацията на нови технологии за обработка на наземни и сателитни данни.*

*Методите и обработката на радарните изображения могат да бъдат използвани за интерферометрични измервания на релефа на земната повърхност, картографиране и следене на пукнатини, за получаване на изображения на обекти върху нея и оценки на процесите на нейното движение при различни геологични феномени.*

*Ключови думи: интерферометрия, радар, интерферограма, сателитно изображение, мониторинг, моделизация*

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Многобройните спътници в орбитата около Земята позволяват събирането на хиляди изображения, които са в основата на информацията за различни процеси и явления на земната повърхност, както и на техните параметри. *Пасивните* сателитни системи (оптични системи) регистрират отразеното от земната повърхност електромагнитно излъчване на Слънцето под формата на безброй независими светлинни вълни или фотони, а при *активните* спътникови системи, като радара, се изпраща сигнал към земната повърхност и се измерва сигнала, който е отразен.

*Космическите микровълнови радиолокационни системи със синтезирана апертура* (Synthetic Aperture Radar-SAR) са изключително подходящ инструмент за мониторинг на земната повърхност. Монтирани на сателитни носители, те изследват земната повърхност, нейната динамика и обектите върху нея. Дистанционното измерване на динамични във времето сигнали и техните параметри, съхранението и обработването им в реално време са част от някои техни значими предимства [1].

*Радарните изображения* предоставят информация за големи територии от земната повърхност и обектите върху нея чрез изпратени високо информативни електромагнитни импулси и регистриране на обратното електромагнитно излъчване от повърхността. Така се получават 2D изображения - разстояние или време на закъснение и азимут или напречно разстояние. Чрез прилагане на SAR системите в интерферометрията се генерират тримерни изображения на наблюдаваните обекти, като се използва амплитудната и фазова информация [8]. В този случай разгъването на фазата на отразените сигнали се използва за премахване на неяснотата по отношение на промени в деформациите, по-големи от дължината на вълната на сигнала [10].

## 2. ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА InSAR ТЕХНОЛОГИЯТА

SAR интерферометрията (InSAR) е приложена за първи път за топографско картографиране от Graham с помощта на самолетна SAR през 1974 г. Първите практически резултати са получени от Zebker и Goldstein, чрез използване на странично ориентиран радар през 1986 г., като в класическата SAR система е поставена допълнителна антена, разположена в равнина, ортогонална на конвенционалната антена (нова въздушна платформа), формирайки интерферометрични изображения.

Началото на тази технология е дадено със старта на сателитите ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1 и ERS-2 (1992-2001 г.) на Европейската космическа агенция (ESA), заместени от ENVISAT (2003-2010 г.), а понастоящем Aeolus, Sentinel-1 (2 сензора), TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed (Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation - 4 сензора), ALOS-2, RadarSat-2, PAZ (“peace” in Spanish), SAOCOM-1A (SAtélite Argentino de Observación COm Microondas), PALSAR и др. Всички те са част от над 6000 спътника, които летят в Космоса - активно функциониращи от тях около 900, като броят им се увеличава с над 4% годишно.

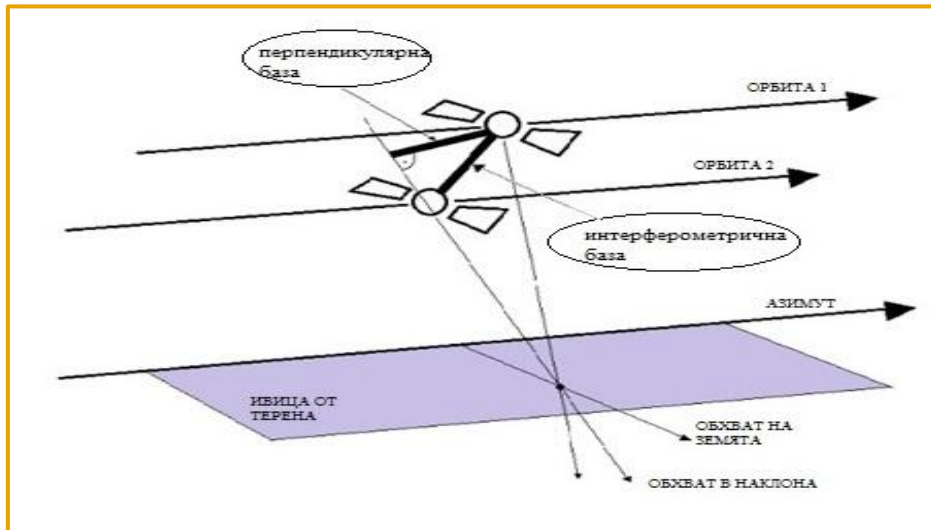
Сателитната радарна интерферометрия е метод на измерване, който използва *ефекта на интерференцията на електромагнитните вълни*. Основната идея на метода е да се формира интерферограма, която е резултат от наслагването от две радарни изображения на една и съща територия, съдържаща информация за амплитудата и фазата на сигнала и получена от идентични радари от близко разположени точки на орбитата.

За да се получат SAR интерферометрични данни, това може да бъде постигнато освен с две антени поставени на борда на космическия апарат (сателит), паралелни на посоката на движение и с изображения направени в различен времеви интервал, но по същия летателен път и съответно наблюдавана геометрия (релеф). Ако антените са разположени напречно на траекторията на сателита ще се появи влияние на топографията на релефа. Разстоянието между двете антени, монтирани върху една платформа, се нарича интерферометрична база (фиг. 1) [2].

Другият вариант е с една антена, монтирана на сателита и данните от нея да се натрупват чрез преминаване над една и съща площ два пъти, като интерферометричната база се формира от свързване на радарните сигнали от повторните преминавания - *многократна интерферометрия*. Тя се осигурява чрез контролиране на траекторията на сателита по такъв начин, че да се повтори пътеката му почти перфектно. Това дава възможност за генериране на топография и за откриване на движения по повърхността.

В обобщен вид за изследване на движението на повърхността, в зависимост от момента и в зависимост от мястото (орбитата), при моностатичната InSAR конфигурация с две антени се използват няколко подхода (техники) [9]:

- наблюдения по едно и също време и от различни позиции, разположени в посока на напречната линия – интерферометрия в напречно направление (across-track interferometry);
- наблюдения в различно време и от една и съща позиция - интерферометрия по направление на посоката (along-track interferometry);
- наблюдения в различно време и от различни орбитални позиции - интерферометрия чрез повторно преминаване (repeat-pass across-track interferometry).



Фиг. 1. Геометрия на сателитните наблюдения с две антени

За изследване на движението на повърхността се използва основно техниката *интерферометрия по направление на посоката*. Чрез този метод повърхността се заснема няколко пъти с времева разлика от секунди до години [6].

За разлика от конвенционалните SAR системи, където местоположението на целта е в две измерения (координати), при InSAR *координатната система е с три измерения*. Освен двете координати, едната по линията на полета (азимута), а другата по разстояние от антената до целта (напречно на направлението на движение), третата координата съответства на стойността на фазата на всеки пиксел, което може да се използва за формиране на релефно изображение.

Всички спътници, оборудвани със SAR сензори, обикалят около Земята по почти полярна орбита на височина 500 до 800 km над земната повърхност със скорост приблизително 7,5 km/s, сканирайки цялата Земя на ленти (фиг. 2). Поради орбитите си и въртенето на Земята те ще повторят точно същия цикъл след определен брой дни, в зависимост от спътника - при Sentinel-1 - 12 дни, TerraSAR-X - 11 дни, COSMO-SkyMed - 16 дни, RadarSat-2 - 24 дни, PAZ - 11 дни, SAOCOM-1A - 16 дни.



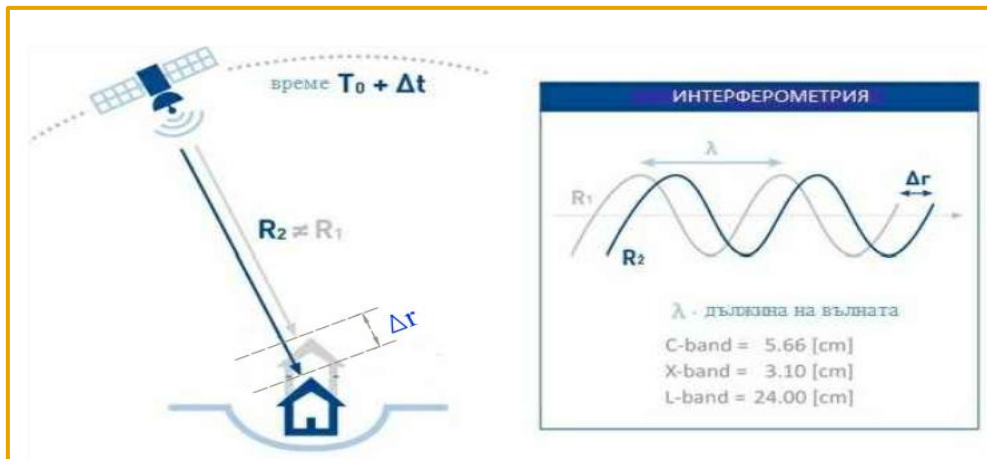
Фиг. 2. Сателитни орбити около Земята

Сателитното изображение се получава от непрекъснато излъчваните милиони радарни сигнали към земната повърхност по *линията на видимост на радара* (Line Of Sight - LOS) [7]. Ъгълът, под който сензорът е насочен към земната повърхност, се нарича ъгъл извън надира (ъгъл на поглед)  $\theta$  (Off-nadir angle) и е от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  (фиг. 3). Частта от изображението, най-близка до надира на радарната платформа, се нарича близък обхват, а най-отдалечената - далечен обхват.



Фиг. 3. Линия на видимост на радара (LOS)

Когато точка върху земната повърхност се движи, разстоянието между нея и сензора се променя и така фазовата стойност, записана от сензора, също ще се повлияе. Измерва се промяната на фазата на сигнала между две изображения, получени за една и съща област, в различно време (фиг. 4).



Фиг. 4. Фазова промяна на сигнала между две изображения

Промяната във фазата на сигнала  $\Delta\phi$  се изразява с уравнението:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\phi_{\text{атм}} + \Delta\phi_{\text{вид}} + \Delta\phi_{\text{ш}}, \quad (1)$$

където  $\lambda$  е дължината на вълната,  $\Delta\phi_{\text{атм}}$  е влиянието на атмосферните ефекти (най-вече влагата, която променя нейната дължина),  $\Delta\phi_{\text{вид}}$  е влиянието заради различните ъгли на видимост на сателитите, вследствие топографските промени (изкривявания), а  $\Delta\phi_{\text{ш}}$  е фазовия “шум” (ефектите на декорелация).

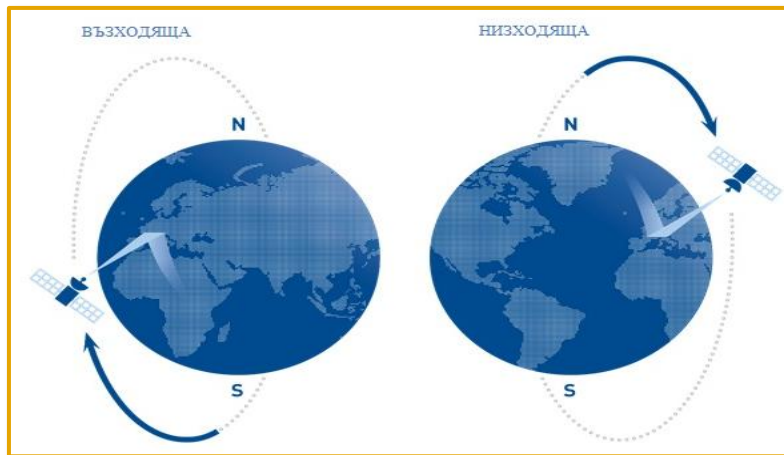
Изместването  $\Delta r$  на радарната цел в линията на видимост се определя от измерените разстояния

$$\Delta r = R_2 - R_1. \quad (2)$$

Полезна разновидност на сателитната радарна интерферометрия е *диференциалната интерферометрия* (DInSAR), която макар и да не е с висока точност при измерванията (при определени условия може да бъде много добра - милиметрова до сантиметрова), позволява установяване и регистриране на премествания (напредващо движение), с цел ранно предупреждение. DinSAR е подходящ метод за наблюдение на бавно движещи се участъци от земната повърхност (напр. свлачища). В този случай топографските промени са на база числения модел на релефа (DEM - Digital elevation model) и поради това в дясната част на израза за  $\Delta\phi$  (1) трябва да се добави и  $\Delta\phi_{\text{модел}}$  [5].

От особено значение при обработката на данните е и *използвания честотен диапазон (обхват, лента) B* (C band 4-8 GHz; X 8-12 GHz; Ku 12-18 GHz). Така например при използването на данни от C band на Sentinel-1 (те са безплатни) и X диапазона на TerraSAR-X/TanDEM-X недостатъчната съгласуваност на изображенията е основното ограничение.

При зададена определена орбита на спътника той преминава както от юг на север (*възходяща орбита*), така и от север на юг (*низходяща орбита*) (фиг. 5). Тъй като радарът “гледа” към Земята под ъгъл и посоката на гледане обикновено е фиксирана, то земната повърхност се наблюдава от две различни посоки. Тези две измервания могат да се комбинират за дефиниране на хоризонтални и вертикални премествания.

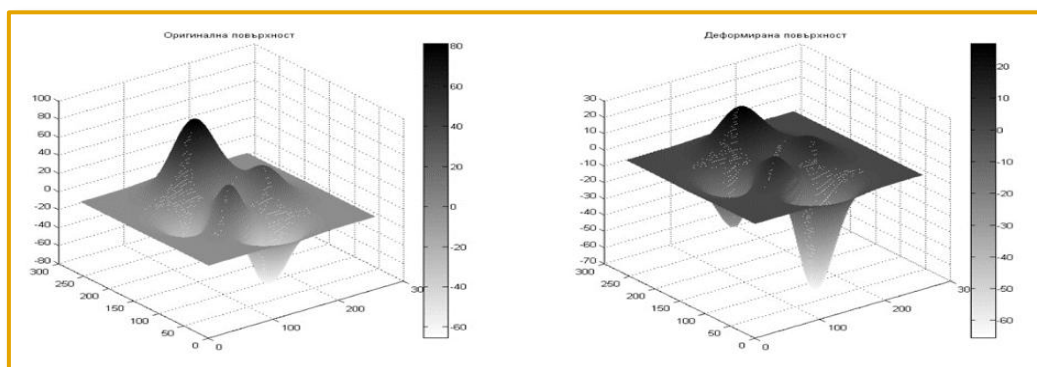


Фиг. 5. Възходяща и низходяща орбита на спътника

### 3. ОБРАБОТКА НА РАДАРНИТЕ ДАННИ И СЪЗДАВАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЕ

Методите за обработка на радарната информация са с *основни приоритети* осигуряване на необходимата точност, бързина, прецизност при отстраняване на грешките (шумовете) (изброени в (1)) и визуализацията. Основната идея е формирането на интерферограма, която е резултат от сравнението на две радарни изображения на една и съща територия, получени от радари в близко разположени точки на орбитата.

Основен метод е *методът на двете преминавания*, наричан още елиминация чрез цифров модел на релефа. Цифровият модел на релефа (DEM) премахва ефекта на топографията. От две изображения се получава *интерферограма*, а от цифровия модел на релефа симулирана (синтезирана) интерферограма със същата геометрия като реалната. Резултантната интерферограма (“*диферентна интерферограма*“) като разлика между тях съдържа само промените в преместването при формиране на SAR-изображението (фиг. 6) [2], [11].

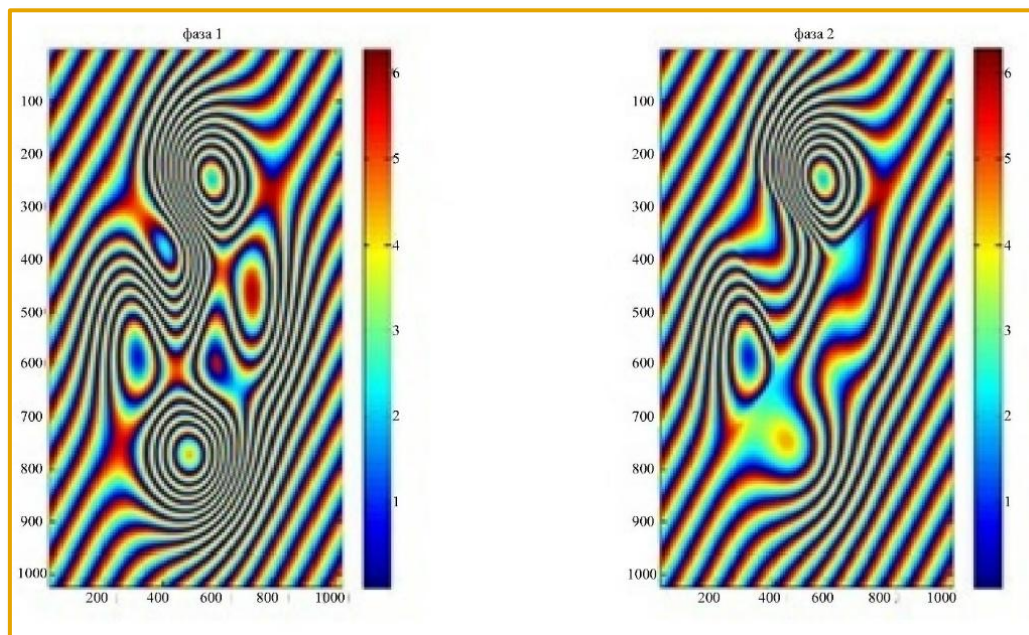


Фиг. 6. Резултантна интерферограма

Самата интерферограма като разликата на фазовите стойности, съответстващи на определена област, представлява цифрово представяне на промяната в повърхностното изместване. Това е най-предпочитаният метод за изчисление, а *диферентната SAR интерферометрия* е базова техника за изследване на геодинамични процеси.

Една интерферограма, след разстилане (разгъване) на фазата [12] се показва условно и с изображения, съставени от цветни пиксели. При липса на напрежение на терена, не се променя цвета или цветовете са създаващи впечатление за случаен шум. Когато има изменение на повърх-

ността са налице сектори на промяната на цвета, което показва размера на деформацията по ивици (фиг. 7).



Фиг. 7. Наличие на деформации при изображение с цветни пиксели

Използването на множества от данни от множество изображения дава възможност да се идентифицират стабилни отражатели, наричани още постоянно (устойчиво) разпръскващи (Permanent /Persistent Scatterers или PS), които са точки на земята, които връщат стабилни сигнали към сателитния сензор (сгради, метални предмети, пилони, антени, открити скали и др.). Това позволява повърхностното изместване да се измерва с милиметрова точност, за което има разработени и алгоритми (програми), като например PSInSAR®, лицензиран за приложение в световен мащаб, SqueeSAR и др.

#### 4. СЛЕДЕНЕ НА ДЕФОРМАЦИОННИ ПРОЦЕСИ. ГРЕШКИ И ТОЧНОСТ

Чрез комбиниране на поредица от сателитни измервания може да се проследи деформацията на определено място във времето, при условие, че отражението е приблизително еднакво във всяко сателитно изображение. Тъй като сателитите “гледат“ към Земята под ъгъл (ъгъл  $\theta$  на фиг. 3), то измерването на деформации върху земната повърхност е само в тази посока, докато самата деформация може да има както хоризонтална, така и вертикална компонента. Определянето на тези компоненти се постига чрез разлагане на множеството сателитни изображения, получени както при възходяща (на север), така и при низходяща (на юг) орбита. Поради именно тази посока на летене на спътниците (орбита близка до полярната), измерванията са *много по-малко чувствителни* към движенията (преместванията) в направление север - юг.

Сателитните изображения се свързват на ниво подпиксел. Ако има несигурност в последователността (времето) на отражение, точката за която се отнася измерването се отстранява от картата на деформациите. Променящите се във времето обекти не са подходящи за разлика от твърдите повърхности, които отразяват постоянно през цялото време. Тези обекти се наричат *кохерентни отражатели* и са в основата на прецизните измервания на деформации.

Най-често при DinSAR се генерират двойка интерферограми с висока кохерентност, като този метод дава много добри резултати за премахването на всички ограничаващи фактори (1), за да остане само изместването  $\Delta g$ . Сред типичните повърхности с ниска кохерентност са горите и

други райони с гъста растителност. Снегът и промяната на влагата в близост до повърхността също могат да причинят загуба на кохерентност [14].

За да се повиши точността при определяне на абсолютните разстояния, респективно на преместванията (деформациите), измерванията се правят и по отношение на *референтна точка* (REF) (аналогично на относителните измервания при ГНСС). По този начин високоточните InSAR измервания се използват оптимално за осигуряване на *стойности на деформациите с милиметрова точност*, а референтната точка (станция) се избира на място, което е стабилно по отношение на деформации.

*Пряко влияние върху точността* на спътниковите радарни измервания оказват както *техническите възможности* на използваната апаратура, така и *условията (средата)*, където се провеждат.

Едно от ограниченията е *времевата декорелация* в резултат на изменение на спектъра и топлинните характеристики на земната повърхност между получаването на две изображения. Проблемите с некохерентната среда (растителност) се преодоляват като вместо С-честотен диапазон ( $\lambda = 5,6$  cm) се използват снимки, предоставени от радарни сигнали използващи L-честотен диапазон ( $\lambda = 0.75-0.5$  cm) [13]. Интервалът от време между заснеманията не трябва да бъде голям, за да се избегнат промените върху повърхността, които могат да доведат до липса на съгласуваност на изображенията. *Декорелация в пространството* е прекомерното отдалечаване на позициите на двата сателита - над 1000 m може да се стигне до пълна загуба на съгласуваност на изображенията.

Друг проблем за InSAR технологията е *променящата се атмосфера* на Земята. Слънцето загрева земната повърхност и по този начин произвежда топлина и водна пара, увеличавайки атмосферните турбуленции, т.е. от значение е и времето от денонощието. В районите с по-малка географска ширина (по-близко до Екватора) въздухът съдържа повече водни пари отколкото около полюсите. Концентрацията на водни пари и облаците водят до фазови измествания, които могат да симулират деформация на земната повърхност, а атмосферното налягане и температурата забавят сигнала (тропосферни и йоносферни смущения). Облаците например могат да предизвикат промени във фазите, еквивалентни на земни премествания до 10 cm. Повърхностните деформации се измерват само в пряка видимост (LOS) от спътника, като неясноти в разчитането на интерферограмата се преодоляват чрез комбинации от данни, получени при различни ъгли на наблюдение [4], [13].

*Влиянието на кривината на Земята* върху фазата се коригира със специална процедура “оплоскостяване” (“flattening”) чрез използване на информация (корекции) на база навигационното съобщение от спътниците [2]. Допълнителни източници на декорелация могат да бъдат *лошото качество на използвания цифров модел* на релефа или *броя на свързващите точки* и пространственото разпределение на изображенията. Точното цяло число от фазови цикли е необходимо да бъде добавено към измерването на фазата, за да се получи вярното наклонено разстояние, тъй като промяната на повърхността се измерва като част от фазовия цикъл. За тази цел абсолютната фаза, която е била “сгъната” в интервала (- $\pi$ , + $\pi$ ) се реконструира като се *разгъва*. Това като аналогия е много близко до часовника, когато за да се определи един точен момент е нужен и момента от денонощието, и датата, а не само да се виждат показанията на циферблата от 1 до 12 (реално те отговарят на интервала - $\pi$ , + $\pi$ ). Процедурата е чувствителна към геометрията на сателита и изисква къси базови линии. Резултатната разгъната фаза се трансформира от радарната координатна система (разстояние/азимут/височина) до конвенционална геодезична система, като например WGS84 (географска ширина, географска дължина и височина над елипсоида - В, L, Н) посредством т.нар. процедура *геокодиране*.

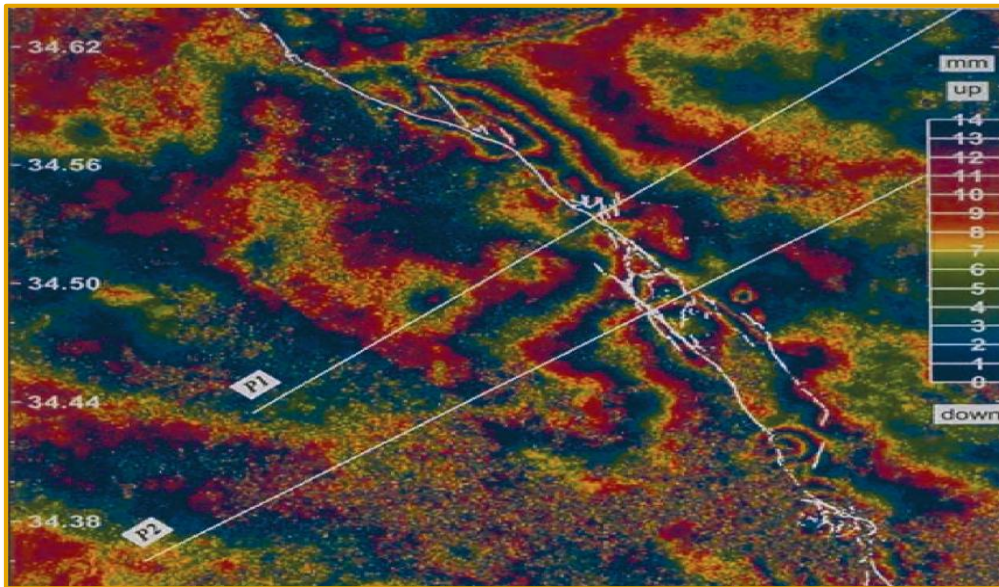
Във варианта с референтна точка, както в традиционните геодезически мрежи, точността на измерване намалява с увеличаване на разстоянието от базовата точка.

Резултатите от съвременната InSAR радарна интерферометрия позволяват *да се заснеме релефа* (земната повърхност) на обширни райони (ширина до 250 km) с точност  $\pm 2,8$  cm [3]. Тази



възможност се използва за мониторинг не само на деформации, но и при локализиране на разломни пукнатини, ерозия, абразия и др.

За отделна точка точността в нейното положение при стандартна разделителна способност може да достигне 6-8 mm, при скорост на деформационния процес 1-2 mm/год. (при линеен тренд), а за висока резолюция - 2-3 mm при скорост по-малка от 1 mm/год (фиг. 8).



Фиг. 8. Премествания, регистрирани със сателитна радарна интерферометрия

## 5. ПРЕДИМСТВА И ПРИЛОЖЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЯТА

Космическите радиолокационни системи намират своето значимо приложение в много области и дейности, включително и от чисто научен интерес.

*Съществено предимство* на InSAR пред ГНСС и конвенционалните геодезически технологии е, че тя дава възможност да се получи съвременна информация за поведението на *големи площи* от повърхността, при което *отпада необходимостта* от скъпо наземно оборудване или скъпи кампании в непристъпни или отдалечени райони на Земята. Микровълновият кохерентен комплексен SAR сигнал осигурява високоскоростен достъп до данни и тяхната обработка, при което се изгражда архив, който дава *възможност за продължително наблюдение* на области от земната повърхност.

Методите и обработката на SAR изображения могат да бъдат използвани за интерферометрични измервания на релефа на земната повърхност, за получаване на изображения на обекти върху нея и оценки на процесите на нейното движение, като свличания на земни маси, измествания на повърхностните слоеве в резултат на земетресения и вулканична активност.

Радарът е в състояние да предава сигналите си през облаци и е независим от излъчването от Слънцето, което му дава големи предимства пред пасивните сателитни системи. InSAR има много предимства за наблюдение на деформации на повърхността с генерирани *много по обем и достатъчно точни данни*. Неговите оперативни възможности могат да бъдат използвани денонощно и целогодишно.

Значими са и предимствата за наблюдение на деформации на повърхността, свързани с устойчивостта на бордовете при минни обекти разработвани по открит начин, на състоянието и сигурността при големи изкуствени водни обекти и др.

*Радиолокационната интерферометрия* е перспективен подход и при изследванията от метеорологична и научна гледна точка за промените (вариациите) в *отражателната способност на атмосферата*, създавайки основата за нейната моделизация.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При пасивните дистанционни изследвания се използва естественото отражение или вторичното топлинно излъчване на обектите от земната повърхност, обусловено от слънчевата активност и те под формата на различни снимки - фотографска, телевизионна и др. - са добро средство за онагледяване. При активните методи за дистанционно изследване на Земята се регистрират отразените от земната повърхност изпратени сигнали, които могат да бъдат с голяма обзорност - за глобални и локални наблюдения, при много добра разделителна способност.

Развитието на SAR технологията понастоящем позволява промяна на мястото на радарните системи, при което измерванията могат да се извършват и от самата земна повърхност. Общата тенденция при регистриране на промени (премествания) е получаването им не само в едно направление, а като пространствен вектор.

Това е една добра алтернатива за изработване и поддържане на вече изработени геодезически модели на части от земната повърхност (сборно понятие "местност"), както и за решаване на различни инженерно-геодезически задачи, най-вече свързани със следенето на деформационни процеси.

## REFERENCES

1. Лазаров, А., Минчев, Д. "SAR Imaging Model", БСУ, Конференция, 2010.
2. Минчев, Д.П., Интерферометрични методи и алгоритми за моделиране и обработка на сателитни SAR изображения, Дисертация, БАН, ИСТ, София, 2012.
3. Наблюдение на Земята от Космоса, ИКИТ-БАН, с.62-64, 2018.
4. Bürgmann, R., Rosen, P., Fielding, E. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28, 2000.
5. Farova, K., Korachkova-Strnadovaq V., Jelenekq J., Kycl, P. Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic, *RG Journal*, 11(22), 2019.
6. Hanssen, R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, *Remote Sensing and Digital Image Processing, Volume 2*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001.
7. Hensley, P.S., Joughin, I., Li, F., Madsen, S., Rodriguez, E., R. Goldstein R. Synthetic Aperture Radar Interferometry, in *Proc. IEEE*, vol. 88, No. 3, 2000.
8. Mayer, E., Rott, C., Henry, H. Mapping mining-induced subsidence from space in a hard rock mine, example of SAR interferometry application at Kiruna mine, *CIM Bull.*, vol. 97, no. 1083, 2004.
9. Pepe, A. and Calò, F. A Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements, *Appl. Sci.*, 7(12), 1264, 2017.
10. Reeves, B., Noon, D., Stickley, G., Longstaff, D. Cooperative Research Centre for Sensor Signal and Information Processing (CSSIP), The University of Queensland, Australia, 2001.
11. Small, D., Barmettler, A., Egliq T. Differential SAR-Interferometry, 2008.
12. Suksmono, A.B., Hirose, A., Interferometric SAR image restoration using Monte Carlo metropolis method, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 2, Feb. 2002.
13. Wright, T. Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar Interferometry, *Phil. Trans. R. Soc.*, London, 2002.
14. Zhao, C., Lu, Z., Zhang, Q., De, J. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS /PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA, *Remote Sens. Environ*, 124, 2012.