

## Utvrdjivanje koseizmičkih deformacija tla upotrebom DInSAR tehnike

DRAGANA D. ĐURIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd  
DRAGANA J. ILIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Originalni naučni rad  
UDC: 621.396.965.4  
DOI: 10.5937/tehnika1804503D

*U radu je prikazana tehnika, diferencijalna interferometrija radara sa sintetičkom aperturom (DInSAR), koja obuhvata procesiranje najmanje dva SAR snimka istog dela površine terena, načinjenih u dva različita perioda. Na ovaj način moguće je izvršiti detekciju i kvantifikaciju centimetarskih promena terena koje su se desile između dva snimanja. Pomeranje se računa diferencijacijom fazne komponente dva sjedinjena SAR snimka nakon uklanjanja topografskog uticaja. U radu su opisani produkti Sentinel 1 misije, date su smernice i opisana je metodologija obrade i tumačenja rezultata u cilju utvrđivanja iznosa koseizmičkih pomeranja na bilo kom prostoru ukoliko snimci imaju zadovoljavajuću koherenciju. Procedura obrade je demonstrirana korišćenjem snimaka na području južnog Tajvana, koje je bilo pogođeno zemljotresom 6. februara 2016. godine.*

**Ključne reči:** *Kopernikus program, Sentinel 1, zemljotres, LOS pravac, Tajvan*

### 1. UVOD

Za potrebe hitnih intervencija u slučaju jakih potresa ili elementarnih nepogoda neophodno je u što kraćem roku doći do informacija o lokacijama sa najviše promena na terenu, bilo da je u pitanju isključivo kretanje po rasedu ili je došlo do rušenja objekata u zoni potresa. U takvim slučajevima neophodno je za relativno kratko vreme obezbediti značajan broj podataka, tj. informacija koje mogu imati praktičnu primenu.

Sentinel 1 satelitska misija je lansirana 2014. godine i jedna od prvih informacija, koja je dobijena posredstvom ove misije i Kopernikus tima, je u vezi sa praćenjem poplava na Balkanskom poluostrvu u maju 2014. godine. Tom prilikom je Kopernikus isporučio prve informacije regionalnog karaktera o obimu i površini poplavljenog područja uz označavanje najugroženijih zona. Sentinel 1 nastavlja da snima, prikuplja i obrađuje podatke na celoj površini Zemlje (sa fokusom na Evropu) i stavlja ih na raspolaganje široj svetskoj zainteresovanoj naučnoj i stručnoj javnosti od 2014. godine. Od tog trenutka Sentinel snimci počinju da koriste tehnike kao što su: radarska interferometrija

(InSAR) i radarska diferencijalna interferometrija (DInSAR) za praćenje i kvantifikovanje različitih promena. Veliki broj objavljenih radova i istraživanja je usmeren upravo na primenu DInSAR tehnike sa ciljem definisanja iznosa koseizmičkih deformacija tla. Snimci Sentinel 1 misije imali su veliku primenu u praćenju koseizmičkih deformacija tla na primerima Amatrice zemljotresa u Italiji, 2016 [1] [2] [3], Kumamoto zemljotresa u Japanu, 2016 [4] [5] [6] [7], zemljotresa u Tajvanu, 2016 [8], kao i u Meksiko Sijetu, 2017 [9]. Pri analizi ovih potresa došlo se do veoma pouzdanih informacija o veličini deformacije tla centimetarske preciznosti.

Republika Srbija spada u područja sa umerenom seizmičkom aktivnošću [10][11]. Međutim, u bliskoj i daljoj prošlosti su se događali zemljotresi sa magnitudama većim od 5 [12] [13], koji se mogu svrstati u jake potrese, od kojih je poslednji bio zemljotres u Kraljevu 2010. godine. U budućnosti se na području Srbije mogu očekivati potresi većeg intenziteta, prilikom kojih bi tehnika DInSAR uz Sentinel 1 podatke, mogla biti od velike koristi pri prvim i brzim analizama.

Sva je prilika da će se satelitske misije, tehnike obrade i programski paketi razvijati u pravcu Open access and free data (OAFD) i stoga je u ovom radu prikazana metodologija, način i postupci obrade i analize besplatnih i dostupnih podataka u cilju određivanja iznosa deformacije tla.

Adresa autora: Dragana Đurić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7  
e-mail: dragana.djuric@gf.bg.ac.rs  
Rad primljen: 20.06.2018.  
Rad prihvaćen: 17.07.2018.

Diferencijalna interferometrija (DInSAR) je tehnika koja ima primenu u preciznom određivanju deformacija tla i objekata u rasponu talasne dužine radara. DInSAR tehnika se može uspešno primeniti za merenje deformacija Zemljine površine usled delovanja aktivnih vulkana, koseizmičkih pomeranja, post seizmičkih pomeranja, rudarstva, podzemne eksploatacije, urbanizacije, većih (sporih) pomeranja tla usled procesa klizanja ili sleganja terena [14].

Kada su pomeranja na površini terena koherentna i zabeležena na nekoliko susednih piksela snimka, deformacije se mogu uočiti. Diferencijalna faza sadrži informacije o promeni u pravcu antene, odnosno u LOS pravcu. Preciznost detektovanih pomeranja koja se može postići diferencijalnom interferometrijom je u manjem rasponu od talasne dužine radarskog signala, i kreće se od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Visoka preciznost je posledica analize razlika na interferogramu načinjenih u određenom vremenskom razmaku. Kako bi se postigla visoka preciznost detekcije pomeranja, potrebni su podaci o topografiji područja od interesa, kao i podaci o položaju i azimutu radarske antene. Merenje fazne razlike, na dva radarska snimka, omogućava definisanje jedne komponente vektora pomeranja u prostoru, i to u pravcu senzora satelita tzv. „linije vidljivosti“ (eng. Line of Sight - LOS).

U ovom radu, za demonstraciju su korišćena dva SAR snimka Sentinel 1 misije, na zemljotresom pogođenom području južnog Tajvana, 6. februara 2016. godine sa epicentrom na 28 km severoistočno od grada Pintung. Magnituda ovog zemljotresa je bila 6.4 po Rihтеру a dubina do ognjišta oko 23 km.

## 2. PODACI

Projekat Kopernikus je započet 2014. godine lansiranjem Sentinel-1A satelita. Sentinel-1 misija se danas sastoji od konstelacije dva satelita (A i B) koji dele istu orbitalnu ravan i koji omogućavaju dobijanje podataka nezavisno od doba dana ili vremenskih prilika, sa periodom ponovnog preleta područja od interesa od 6 dana.

Sentinel-1 obuhvata snimanje C-kanalom (talasne dužine,  $\lambda = 5.6$  cm) u četiri režima snimanja različite prostorne rezolucije (do 5 m) i različite pokrivenosti (do 400 km). Omogućava dvostruku polarizaciju, vertikalnu i horizontalnu, kao i njihove kombinacije. Osim toga, za ovu misiju su karakteristična vrlo kratka vremena ponovnog preleta i brza dostupnost proizvoda. Za svako osmatranje, dostupne su precizne orbite i putanje satelita (efemeride).

Satelitski par ima ponovljenu frekvenciju (uzlazno/silazno) od 3 dana na ekvatoru, manje od jednog dana na Arktiku i očekuje se da obezbedi pokrivenost

nad Evropom, Kanadom i glavnim pravcima u roku od 1-3 dana. Strategija Sentinel 1 tokom punih operativnih kapaciteta zasniva se na optimalnoj upotrebi SAR radnog ciklusa (25 min / orbita) uzimajući u obzir različita ograničenja, optimalnoj upotrebi pojedinačnih i dvostrukih polarizacionih akvizicija, u skladu sa raspoloživim kapacitetom za dolazne veze.

Sentinel 1 proizvodi su detaljno opisani na zvaničnom sajtu Kopernikusa (<https://sentinels.copernicus.eu>). Podaci koji se koriste u DInSAR tehnici, nad kopnom, pripadaju interferometrijskom režimu širokog razmaka (eng. Interferometric Wide Swath, IW), karakterističnom režimu preko kopna i priobalnih područja.

Podaci Sentinel 1 misije se mogu naći u nekoliko nivoa obrada, od nivoa 0 do 2. Za potrebe interferometrije koriste se tzv. Level-1 podaci u SLC režimu (Single Look Complex), koji se sastoje od fokusiranih geo-referenciranih SAR podataka koristeći podatke o orbiti i položaju sa satelita. Polarizacija IW snimaka može biti pojedinačna, odnosno vertikalna (VV), ili horizontalna (HH). Proizvodi uključuju pojedinačni izgled u svakoj dimenziji koristeći propusni opseg prenosa signala i sastoje se od složenih uzoraka koji čuvaju fazne informacije.

Podaci korišćeni u radu obuhvataju dva SAR snimka, Level 1 SLC, VV polarizacije u uzlaznoj orbiti (Copernicus Sentinel data, 2016, processed by ESA), i to:

- S1A\_IW\_SLC\_\_1SDV\_20160202T100019\_20160202T100049\_009766\_00E469\_C19; načinjenog 02.02.2016.
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SDV\_20160214T100019\_20160214T100049\_009941\_00E981\_ABD9; načinjenog 14.02.2016.

## 3. OBRADA PODATAKA

Platforma za obradu svih Sentinel podataka naziva se Sentinel aplikaciona platforma (eng. Sentinel Application Platform, SNAP). Osnovne funkcije uključuju učitavanje proizvoda, istraživanje komponenti proizvoda, kao što su trake, maske i mreže tačaka. Alatke za navigaciju i informacije o pikselima takođe predstavljaju neke od osnovnih mogućnosti. Obrada Sentinel 1 podataka obuhvata niz koraka u SNAP-u šematski prikazanih na slici 1.

Prvi korak u procesu obrade predstavlja podelu snimka. Ovaj korak je bitan kako bi se uzelo samo područje od interesa i samim tim skratilo vreme procesiranja. Sledeći korak u procesu obrade je primena orbitnih fajlova. Orbitni fajl pruža tačnu poziciju satelita i informacije o brzini. Na osnovu ovih informacija, vektori stanja orbita se ažuriraju u

metapodatku, kako bi se dobile veoma precizne orbite oba snimka. Treći korak u procesu obrade je koregistracija dva snimka. Koregistracija je jedan od osnovnih i najvažnijih koraka za formiranje interferograma, jer obezbeđuje da svaka tačka na površini pripada istom pikselu na oba snimka. U idealnom slučaju savršenih paralelnih orbita i usklađenih akvizicija, koregistracija bi trebalo samo da kompenzuje različitu geometriju zbog drugog ugla, što bi bilo nadoknađeno pravilnim istežanjem jednog snimka. U praksi, koregistracija bi takođe trebalo da uključi i prelaz ili skretanje orbite, različite položaje senzora, različite stope uzorkovanja, pomeranje uz i preko trake [14].

Nakon koregistracije sledi računanje interferograma i interferogramske koherencije. Generisanje interferograma zahteva izračunavanje Hermitskog proizvoda dve koregistrovane slike filtrirane spektralnim smicanjem [14]:

$$v_i = u_M \times u_S^* \quad (1)$$

gde se  $u_M$  i  $u_S$  odnose na glavni i sporedni snimak respektivno. Ovde, pretpostavljena konvencija obezbeđuje da se interferogram registruje u istom lokalnom sistemu kao i glavni snimak. Njegova faza je razlika između faze glavnog i sporednog snimka, i ukoliko je neophodno, nadoknađuje se za bilo koji sledeći topografski obrazac [14].

Koherentnost ili bolje rečeno apsolutna vrednost, je indirektna mera kvaliteta interferograma. U slučaju interferometrijskih snimaka, amplituda  $|v|$  svakog piksela interferograma je proporcionalna proizvodu amplituda  $|u_1|$ ,  $|u_2|$  od dva početna snimka, a njegova faza  $\phi$  je jednaka njihovoj faznoj razlici.

Pikseli SAR snimka nose informacije spontanog refleksija i stoga se može očekivati da amplitude interferograma veoma fluktuiraju čak i u najpovoljnijem slučaju bez privremene dekorelacije i nulte bazne linije [15]. Dakle, promene faznog šuma od piksela do piksela zbog različitog uticaja nasumičnih šumova stoje nasuprot slučajnim amplitudama piksela. Pikseli sa slabom refleksijom će pokazati rasutije interferometrijske faze, dok će jaki i stabilni reflektori doneti pouzdane faze. Mera ove promene  $\gamma$ , koherentnost dva SAR snimka Fretti [14] definiše sa [14] [15]:

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} = \frac{E[v]}{I}; |\gamma| < 1 \quad (2)$$

gde je  $E$  očekivana vrednost slučajne varijable  $h$ .

Za dva talasa sa faznom razlikom koja ostaje konstantna tokom vremena se kaže da su koherentna [15]. To znači da koherencija postoji kada su frekvencije talasa identične, bez obzira koliko je različita amplituda ili kolika je razlika u fazi. Koherencija predstavlja meru sličnosti između dva snimka, koji

čine interferogram i upoređuje kompleksne vrednosti amplitude i faze oba snimka kombinovane u normalizovanu vrednost, u rasponu od 0 – 1.



Slika 1 - Šema procesa obrade snimaka i izrade interferograma

Niska vrednost koherencije, odnosno nepostojanje sličnosti između dva snimka se označava nulom i predstavljena je pikselima crne boje, dok se visoka vrednost koherencije, odnosno dva savršeno identična snimka označavaju jedinicom i predstavljena je pikselima bele boje [16]. Često su područja pod vegetacijom zapravo područja na snimcima sa niskom koherencijom, dok su urbana područja sa visokom koherencijom. Razlog ovakve raspodele koherentnosti leži u koeficijentu refleksije, koji je visok u urbanim sredinama, dok je u područjima sa vegetacijom koeficijent refleksije veoma nizak. Koeficijent refleksije u urbanim sredinama može da varira i zavisi od morfoloških odlika veštačkog objekta (hrapavosti, površine i orijentacije površina prema LOS), dok se i kod prirodnih pojava kao što su npr. ogoljeni izdanci čvrstih stenskih masa (krečnjaka, granita itd) može dobiti jednako visok nivo koherencije i refleksije ukoliko su povoljnih pomenutih morfoloških odlika.

#### 4. UTVRĐIVANJE IZNOSA KOSEIZMIČKIH DEFORMACIJA

Izrada diferencijalnog interferograma i obrada u cilju dobijanja karte deformacije prikazana je na slici

2. Dalja obrada zahteva učitavanje interferograma nad kojim nije vršena geometrijska korekcija (Snmak.igf.wrapped na slici 1.) Ulazni interferogram se opisuje kao sirov interferogram, jer faza ima dosta šuma. Uobičajena je praksa da se šum smanji izračunavanjem prosečne vrednosti susednih piksela u složeni interferogram. Ovaj proces, definisan kao složeni „multilooking“ razmenjuje geometrijsku rezoluciju za faznu tačnost [16].

Takvo izračunavanje proseka je vrlo efikasno u odnosu na bilo koje neusaglašene šumove zbog vremenskih, osnovnih, volumenskih i drugih izvora. Primena kompleksnog „multilooking-a“ interferograma može se obaviti biranjem dostupnih algoritama. Umesto najjednostavnijeg algoritma, koji podrazumeva da su maske pravougaone i projektovane da imaju istu veličinu azimuta i terena, bolje je primeniti kompleksni algoritam, gde su oblasti homogenih spekli (eng. Speckle) ranije identifikovane filterom „speckle-Lee“, a potom višenamenski iskorišćene.

Ovakav pristup rezultira izračunavanjem proseka preko nejednakog prozora, čiji su oblik i veličina prilagođeni prema lokalnoj statistici [14]. Postupak filtriranja je sledeći korak u nizu. Filtriranjem se uklanjaju smetnje kako bi se lakše uočile promene u deformaciji tla. Goldstein i Werner su u [17] predložili adaptivni radarski interferogramski filter baziran na Furijeovom spektru  $Z(u, v)$  sastavljen od malih delova interferograma sa njegovom izglađenom apsolutnom vrednošću  $S\{Z(u, v)\}$  do snage eksponenta  $\alpha$ , u vidu jednačine [14]:

$$H(u, v) = S\{|Z(u, v)|\}^\alpha Z(u, v) \quad (3)$$

gde je  $H(u, v)$  odgovor filtera (spektar filtriranog interferograma),  $S\{\cdot\}$  je operator za glađenje,  $u, v$  su prostorne frekvencije, a  $\alpha$  je parametar filtriranja. Delovi su definisani kao mali delovi interferograma i preklapaju se kako bi sprečili diskontinuitet na granicama.

Parametar filtera  $\alpha$  uzima prvo vrednost između 0 i 1 i ima najveći uticaj na performanse filtera. Za vrednost  $\alpha = 0$ , faktor multiplikacije postaje jedan, a nema nikakvog filtriranja. Međutim, za velike vrednosti  $\alpha$ , filtriranje je značajno. Problem se javlja kada je odabrana velika vrednost parametra  $\alpha$ , kao što su [17] pokazali, pa dolazi do gubitka rezolucije u filtriranoj fazi. S druge strane, ako se mala vrednost parametra  $\alpha$  primenjuje, filtrirane faze i dalje imaju šuma. Zbog toga postoji nekoliko razmatranja u određivanju optimalne vrednosti za parametar  $\alpha$ , Baran i dr. u [18] modifikovali su parametar filtera  $\alpha$  kao što je prikazano u jednačini:

$$\alpha = I - \gamma, \quad (4)$$

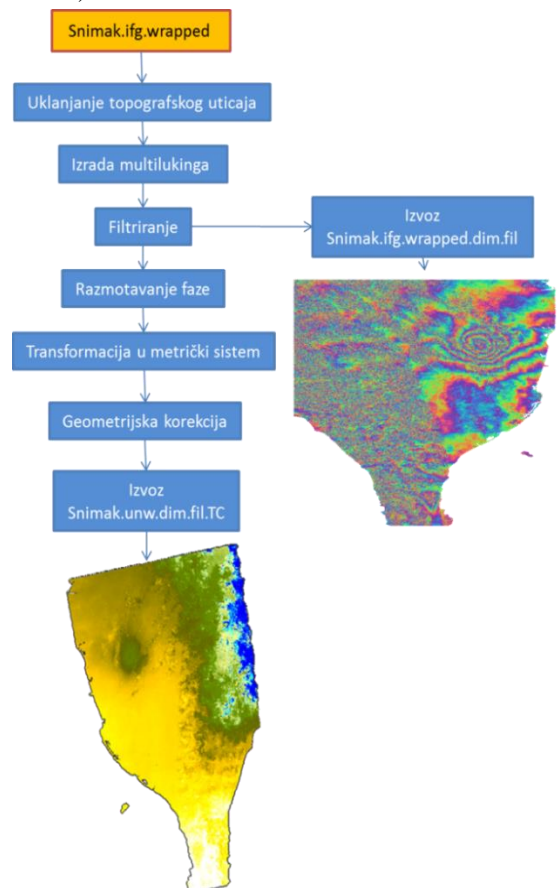
gde  $\gamma$  označava srednju koherentnu vrednost preko efektivnog dela (područje dela interferograma minus područje preklapanja) na interferogramu [19].

Nakon filtriranja vrši se takozvano razmotavanje (eng. unwrapping) faze. Preduslov za primenu faznog razmotavanja je da jedan isti piksel na dva snimka menja svoju poziciju u dva vremenska intervala u kojima su načinjeni snimci. U tom slučaju se dodatna faza, nezavisna od bazne linije, pojavljuje u interferometrijskoj fazi [14] kao:

$$\Delta\Phi_d = - (4\pi/\lambda) * d \quad (5)$$

gde je  $\lambda$  emitovana talasna dužina, a  $d$  je iznos relativnog pomeranja koji je projektovan u LOS pravcu.

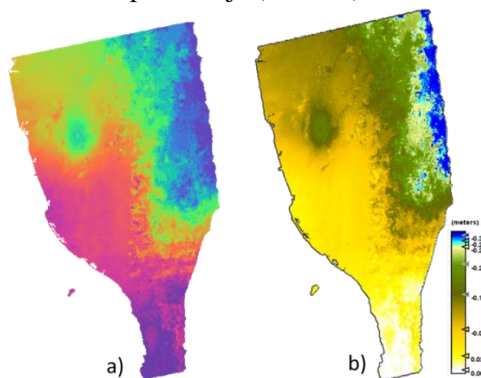
Izravnati interferogram daje dvoznačno merenje relativne visine terena usled  $2\pi$  ciklične prirode interferometrijske faze. Varijacija faza između dve tačke na izravnatom interferogramu obezbeđuje merenje stvarne varijacije visine, nakon brisanja bilo kog celog broja dvoznačnih visina. Proces dodavanja tačnog celog broja koji ima višestruku  $2\pi$  vrednost do interferometrijske granice naziva se razmotavanje faze (slika 3a).



Slika 2 - Šema procesa obrade nerazmotane faze interferograma primenom DInSAR tehnike i izrade karte deformacija na osnovu razmotane faze

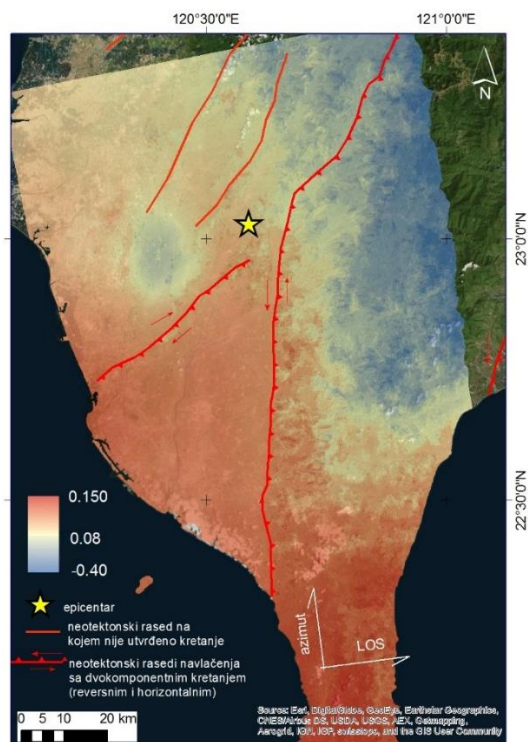
Postoji nekoliko poznatih tehnika za razmotavanje faza. Međutim, potrebno je napomenuti da obično fazno razmotavanje nema jedinstveno rešenje, pa stoga apriori informacije treba eksploatirati kako bi dobili najbolje rešenje [14]. Dvodimenzionalno odmotavanje faze je proces vraćanja nedvoznačnih faznih podataka iz 2D polja faznih vrednosti poznatih samo po modulu  $2\pi$  rad. SNAPHU je program napisan C programskim jezikom, dostupan je za slobodno preuzimanje i korišćenje i predstavlja algoritam za statističke proračune i mrežne protoke [20]. Statistika koja se odnosi na ulazne podatke u rešenju zavisi od izmerene vrednosti, pa SNAPHU sadrži tri ugrađena statistička modela, za topografske podatke, podatke o deformaciji i glatke generičke podatke. Problem optimizovanja je delimično rešen korišćenjem tehnika mrežnog toka. SNAPHU uvek proizvodi potpuna razmotana rešenja, kroz postupak iterativne optimizacije. Rešenje algoritma za rešavanje je zasnovano na optimizaciji mreže. Podrazumevano, SNAPHU pretpostavlja da je njegov ulazni podatak SAR interferogram koji beleži površinsku refleksiju. Za deformacijske interferograme treba ukloniti fazne varijacije zbog topografije.

Na ovakvoj karti se mogu očitati fazna pomeranja u SAR koordinatama, međutim ove vrednosti nemaju praktičnu primenu, pa je neophodno prevesti fazne vrednosti u metričke. Funkcija se naziva Transformacija faze u deformaciju (Phase to displacement). Za primenu ovog operatora, neophodan je digitalni model terena (DMT) koji je potrebno oduzeti od interferometrijske faze (uklanjanje topografske faze). Osim toga, neophodno je primeniti i efemeride satelita kako bi se izračunao fazni pomeraj koji se kasnije oduzima od interferometrijske faze (tzv. uklanjanje faze sa ravnim terenom). Rezultat ove obrade je generisana fazna karta, koja je proporcionalna relativnim pomeranjima terena u LOS pravcu  $d$ , koja se mogu izračunati na osnovu jednačine (5) [14]. Upravo se ovom jednačinom interferometrijska faza pretvara u kartu deformacija, odnosno pomeranja (slika 3b).



Slika 3 - a) Razmotan interferogram sa geometrijskom korekcijom, b) Razmotan i referenciran interferogram spreman za metričko očitavanje

Dobijenu kartu je potrebno podvrgnuti post-procesiranju i podesiti opseg (minimalni/maksimalni mogući iznos kretanja), odnosno uvesti ograničavajuće faktore u prikazu, kao i maskiranje područja sa niskom koherencijom radi lakše i pouzdanije interpretacije. Uz nanošenje rupturnog sklopa i utvrđenih neotektonski aktivnih raseda kao i lokacije epicentra zemljotresa (slika 4), moguće je odrediti iznos pomeranja u zoni od interesa. Pozitivne vrednosti ukazuju na kretanje u pravcu senzora (crvena boja), dok negativne vrednosti (plava) ukazuju na kretanja od senzora i to u odnosu na liniju vidljivosti senzora. Prilikom očitavanja iznosa kretanja, potrebno je uzeti u obzir određeni poligon i skup piksela unutar poligona, a ne samo jedan piksel. Takođe, potrebno je znati da senzor uvek vrši snimanje sa svoje desne strane, bez obzira na to da li se kreće uzlaznom ili silaznom orbitom.



Slika 4 - Karta kumulativnih koseizmičkih deformacija

Na području južnog Tajvana interpretirane su najveće neotektonski aktivne rupturi koje predstavljaju složeni sistem u raseda u zoni subdukcije [21], [22], [23]. Lokacija epicentra zemljotresa preuzeta je sa zvaničnog sajta USGS (<https://earthquake.usgs.gov>) Na konkretnom primeru (Slika 4), utvrđeno je kumulativno kretanje u LOS pravcu u iznosu od oko 9 cm od senzora. Ove vrednosti se u dobroj meri poklapaju sa vrednostima dobijenim u prethodnim istraživanjima na ovom prostoru, kojima je utvrđeno da je maksimalno horizontalno pomeranje u pravcu istok-zapad iznosilo 8 cm, a relativno izdizanje 1-2 cm [24].

Grandin i dr. [25] su predložili tehniku za razdvajanje vertikalne i horizontalne komponente kretanja

pomoću DInSAR tehnike, koja koristi dva nezavisna modela akvizicije, uzlazni i silazni. 3D pomeranje može se izvesti iz četiri komponente kretanja tla, snimane kontinentalnim obodnim interferogramima sa kako uzlaznim tako i silaznim geometrijama. Ovo se postiže rešavanjem linearnog sistema koji uključuje četiri jednačine sa tri nepoznate, i koji se sastoji od pomeranja u pravcu LOS-a i azimuta u uzlaznim i silaznim prolazima [25].

## 5. ZAKLJUČAK

DInSAR tehnika se pokazala izuzetno korisnom pri određivanju vrednosti pomeranja tla prouzrokovanim velikim događajima na granicama ploča, kao što su zemljotresi ili magmatske intruzije, posebno u geografskim područjima gde nedostaju GPS merenja [26], [27]. Glavne prednosti ove tehnike su kontinualna akvizicija, monitoring nedostupnih oblasti, kao i monitoring u svim vremenskim uslovima, merenje vrednosti pomeranja tla, kao i to da je softver za obradu podataka besplatan [25]. Najveće ograničenje „klasične“ DInSAR tehnike u posmatranju kretanja površina je gubitak koherencije, odnosno faznog odnosa između snimaka [14] [28]. Ovo predstavlja problem, posebno u oblastima sa vegetacijom i u oblastima sa izraženim senkama koje mogu biti posledica izražene topografije [25]. Jedno od ograničenja DInSAR-a je i da samo komponenta deformacije koja je u LOS pravcu može biti rešena. Obično se akvizicije od uzlaznih i silaznih prolaza kombinuju kako bi dale dve različite geometrije posmatranja [25]. Čak i tako, zbog skoro polarne orbite SAR satelita, rezolucija po pravcu sever-jug ostaje loša [29]. Kod zemljotresa sa malim površinskim pomeranjima, troposferska kašnjenja mogu biti istog reda veličine, ili čak veća od kretanja tla. Lee i dr. [30], su koristili metod slaganja (eng. stack) za kombinovanje serija interferograma kako bi se umanjile troposferske greške i kako bi se istakli mali koseizmički signali.

## 6. ZAHVALNOST

Ovaj rad je finansijski podržan od strane projekta osnovnih istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja OI 176016. D.Đ. se posebno zahvaljuje NASA, LCLUC, ESA i SCERIN (TAT-6).

## LITERATURA

- [1] Cheloni D, Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6778–6787, doi:10.1002/2017GL073580, 2017.
- [2] Gruppo di lavoro IREA-CNR & INGV., February 1. *Sequenza sismica del Centro Italia 2016-2017: aggiornamento delle analisi InSAR e modello preliminare di sorgente per gli eventi del 18/1/17*. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.266966>, 2017.
- [3] Huang M. H, E. J. Fielding, C. Liang, P. Milillo, D. Bekaert, D. Dreger, and J. Salzer, Coseismic deformation and triggered landslides of the 2016 Mw 6.2 Amatrice earthquake in Italy, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 1266–1274, doi:10.1002/2016GL071687., 2017.
- [4] Mora O, Ordoqui P, Iglesias R, Blanco P, Earthquake rapid mapping using ascending and descending Sentinel-1 TOPSAR interferograms, *Procedia Computer science* 100, 1135-1140, 2016.
- [5] Houjun, J, Guangcai F, Teng W. B, Towards full exploitation of coherent and incoherent information in Sentinel-1 TOPS data for retrieving surface displacement: Application to the 2016 Kumamoto (Japan) earthquake: Full exploitation of Sentinel1 TOPS data. *Geophysical Research Letters*. 44. 10.1002/2016GL072253, 2017.
- [6] Hashimoto M, Localized Deformation Following the April 2016 Kumamoto, Japan, Earthquake detected by InSAR, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 20, EGU2018-2789, EGU General Assembly 2018.
- [7] Ilić D, Đurić D, Određivanje veličine pomeranja tla korišćenjem DInSAR tehnike, *Knjiga apstrakata, 17. Kongres geologa Srbije sa međunarodnim učešćem (Vrnjačka Banja, 17.-20. maj 2018)*, volumen 2, str 742-746, ISBN: 978-86-86053-20-6, Srpsko geološko društvo, Srbija, 2018.
- [8] <http://tre-altamira.com/news/sentinel-1-interferogram-earthquake-taiwan/>
- [9] <http://www.irpi.cnr.it/en/mexico-earthquake-seen-from-space/>
- [10] Marović M, Djoković I, Pešić L, Radovanović S, Toljić M, Gerzina N, Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian basin in Serbia, *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 277–295, 2002.
- [11] Radovanović S, Seismic Hazard Maps and spectra: Catalogue Preparation, Seismotectonic Modeling and Site Class Definitions, *First International Conference Science And Technology For Safe Development Of Lifeline Systems Natural Risks: Developments, Tools and Techniques in the CEI Area*, At: Sofia, Bulgaria, Volume: CD November 2003 DOI: 10.13140/2.1.1763.2648, 2003.
- [12] <http://data.euro.who.int/e-atlas/europe/images/map-serbia/srb-seismic.pdf>

- [13] Abolmasov B, Jovanovski M, Ferić P, Mihalić S, Losses due to historical earthquakes in the Balkan region: Overview of publicly available data, *Geofizika*, Vol. 28, No 1, pg. 161-181, UDC 550.346
- [14] Ferretti A, Prati C, Rocca F, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 39/1, 8–20, 2001.
- [15] Woodhouse I. H, *Introduction to microwave remote sensing*, Taylor & Francis, New York, 2006.
- [16] <https://www.esa.int>
- [17] Goldstein R, Werner C, Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25, 4035-4038, DOI: 10.1029/1998GL-900033, 1998.
- [18] Barran A, Solari L, Béjar-Pizarro M, Monserrat O, Bianchini S, Herrera G, Crosetto M, Sarro R, González-Alonso E, Mateos R, M Ligüerzana S, López C, Moretti S, A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sens.*, 9, 1002, 2017.
- [19] Zhao C, Zhang Q, Ding X, Zhang J, An iterative Goldstein SAR interferogram filter, *International Journal of Remote Sensing*, 33:11, 3443-3455, DOI: 10.1080/01431161.2010.532171, 2012.
- [20] Chen C, Zebker H, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America* 17(3):401-14, DOI: 10.1364/JOSAA.-17.00040, 2000
- [21] Ching K. E, R. J. Rau, K. M. Johnson, J. C. Lee, and J. C. Hu, Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995–2005, *J. Geophys. Res.*, 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058, 2011a
- [22] Ching K. E, M. L. Hsieh K. M. Johnson, K. H. Chen, R. J. Rau, and M. Ying, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *J. Geophys. Res.*, 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242, 2011b
- [23] Brown D, Alvarez-Marron J, Schimmel M, Wu Y. M, Camanni G, The structure and kinematics of the central Taiwan mountain belt derived from geological and seismicity data, *Tectonics*, Vol. 31, TC-5013, doi:10.1029/2012TC003156, 2012.
- [24] Le Béon, M, M. H. Huang, J. Suppe, S. T. Huang, E. Pathier, W. J. Huang, C. L. Chen, B. Fruneau, S. Baize, K. E. Ching, and J. C. Hu, Shallow geological structures triggered during the Mw 6.4 Meinong earthquake, southwestern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 28, 663-681, doi: 10.3319/TAO.2017.-03.20.02, 2017.
- [25] Grandin R, E. Klein, M. Métois, and C. Vigny, Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8.3 Illapel earthquake (Chile) from across- and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2552–2561, doi:10.1002/201GL067954, 2016.
- [26] Peltzer G, F. Crampé, and G. King, Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the Mw7. 6 Manyi (Tibet) earthquake, *Science*, 286(5438), 272–276, 1999.
- [27] Grandin R, et al, 2009. September, Manda Hararo-Dabbahu rifting event, Afar (Ethiopia): Constraints provided by geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 114, B08404, doi:10.1029/2008JB005843, 2005
- [28] Ferretti A. & Crespa S, Advances in Differential SAR Interferometry: from DInSAR to PSInSAR, *CSTARS „Height“ Workshop* October, 24th 2006, Miami, Florida, 2006.
- [29] Wright T. J, B. E. Parsons, and Z. Lu, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01607, doi:10.1029/2003GL018827, 2004.
- [30] Lee C, W. Lu, Z. Jung, H. S, Simulation of time-series surface deformation to validate a multi-interferogram InSAR processing technique. *Int J Remote Sens.* 33:7075–7087, 2012.

## SUMMARY

### CO-SEISMIC SURFACE DISPLACEMENTS ESTIMATION USING DINSAR TECHNIQUE

*The paper represents Differential SAR Interferometry (DInSAR) technique that includes the processing of at least two multitemporal SAR images from the same part of terrain. In this way, it is possible to detect and quantify the centimeter changes in the terrain caused by an earthquake with magnitude higher than 5. Deformation is calculated by differentiating the phase component of the two coregistered SAR images after removing the topographic effect. The paper describes the products of the Sentinel 1 mission, methodology of processing and interpreting the results in order to determine the amount of movements in any area if SAR images have a satisfactory coherence. Procedure was described using two SAR images in south Taiwan area, for earthquake event from 5<sup>th</sup> February, 2016.*

**Key words:** Copernicus programe, Sentinel 1, earthquake, LOS displacement, Taiwan