

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

**Marin Vrankić**

J.P. „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar, mag. ing. geod. et geoinf.,  
marin.vrankic96@gmail.com

**Marijan Grgić**

Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, dr. sc., marijan.grgic@geof.unizg.hr

**Tomislav Bašić**

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, prof. dr. sc.,  
tomislav.basic@fgag.sum.ba

**Sažetak:** Razvoj tehnologije senzora koji se naziva radar sa sintetičkom antenom (SAR) i pripadajućeg softvera za obradu podataka pomogli su da satelitska radarska interferometrija (InSAR), metoda koja koristi više SAR snimki istog područja, prikupljenih sa satelita, postane široko korištena metoda za procjenu deformacije tla kao i drugih geofizičkih procesa, jer pruža milimetarsku preciznost uz veliku prostornu pokrivenost. U radu su obrađene 24 Sentinel-1A snimke za područje zapadne Hercegovine, napravljene tijekom 2020. godine te su određene srednje brzine vertikalnih pomaka koristeći program SNAP (Sentinel Application Platform). Zabilježeni su vertikalni pomaci iznosa  $\pm 10$  milimetara dok srednje brzine pomaka na godišnjoj razini iznose 8 milimetara u vertikalnom smjeru, bez uzimanja u obzir korekcije za utjecaj horizontalnih pomaka. Ostvareni prvi rezultati na području istraživanja ukazuju na određeni trend gibanja tla, ali zbog više vrsta provedenih atmosferskih korekcija, geomorfoloških karakteristika područja istraživanja te pomanjkanja in-situ mjerenja za potrebe usporedbe, morati će se vanjska ocjena pouzdanosti dobivenih deformacija procijeniti u budućim istraživanjima.

**Ključne riječi:** satelitska interferometrija, Sentinel-1, deformacije, vertikalni pomaci

## Monitoring of geophysical processes in the area of western Herzegovina by satellite observations

**Abstract:** Developments in sensor technology called Synthetic Antenna Radar (SAR) and associated data processing software have helped satellite radar interferometry (InSAR), a method that uses multiple SAR images of the same area collected from satellites, to become a widely used method for estimating soil deformation as well as other geophysical processes, because it provides millimeter precision with great spatial coverage. The paper deals with 24 Sentinel-1A images for the area of western Herzegovina, taken during 2020, and determined the average speeds of vertical displacements using the SNAP program (Sentinel Application Platform). Vertical displacements of  $\pm 10$  millimeters were recorded, while the mean annual displacement velocities were 8 millimeters in the vertical direction, without taking into account the correction for the influence of horizontal displacements. The first results in the study area indicate a trend of ground movement, but due to several types of atmospheric corrections, geomorphological characteristics of the study area and lack of in-situ measurements for comparison, external evaluation of the reliability of deformations will have to be assessed in future studies.

**Key words:** satellite interferometry, Sentinel-1, deformations, vertical displacement

## 1. UVOD

Satelitski radari za snimanje počeli su igrati važnu ulogu u daljinskom istraživanju kasnih 1970-ih godina. Prve misije pokazale su da je radar sa sintetičkom antenom (eng. Synthetic Aperture Radar-SAR) u stanju pouzdano kartirati površinu Zemlje i prikupiti informacije o njezinim fizičkim svojstvima, kao što su topografija, morfologija ili hrapavost. SAR je sustav koji koristi elektromagnetske impulse s mikrovalnim frekvencijama omogućujući dobivanje jedinstvenih snimki koje predstavljaju električna i geometrijska svojstva površine u gotovo svim vremenskim uvjetima. SAR je aktivan sustav koji prikuplja podatke na dnevnoj svjetlosti i noću.

Korištenje svemirskih SAR-ova kao interferometra postalo je dostupno 1980-ih, kada je prva civilna satelitska misija, Seasat, lansirana 1978. godine i u samo 100 dana prikupila mnoštvo podataka te pokazala puni potencijal tehnologije (Hanssen, 2001). Tek nakon lansiranja ESA-inog (Europska svemirska agencija) satelita ERS-1 1991. godine ova vrsta mjerenja je upala u oko široj znanstvenoj zajednici. InSAR tehnologija je intenzivno i uspješno istraživana te su rezultati iste objavljeni u mnogim radovima.

Odbijanjem signala satelitskog radara od površine zemlje u istim ili sličnim orbitama i gledajući razlike između snimaka, interferometrijski radar sa sintetičkom antenom može otkriti male razlike u udaljenosti između svog položaja i tla, nastale zbog geofizičkih procesa u nekom vremenskom intervalu. InSAR (eng. Interferometric Synthetic Aperture Radar) prikazuje prostorne obrasce deformacija i u kombinaciji s terenskim mjerenjima daje uvid u široki spektar prirodnih procesa koji su bitni za znanosti o Zemlji (Massonnet i dr., 1993).

Digitalna SAR slika može se gledati kao mozaik piksela. Svaki piksel nosi informacije o amplitudama i fazama mikrovalnog zračenja koje se odbilo od svih raspršivača (poput stijena, zgrada, vegetacije) unutar odgovarajuće ćelije za razlučivanje projicirane na tlo. Amplituda ovisi o hrapavosti i uobičajeno je da izložene stijene i urbana područja pokazuju snažne amplitude, dok glatke ravne površine (poput voda) pokazuju male amplitude. Fazna informacija snimke je izravno povezana s udaljenosti između promatranog terena i senzora na satelitu. Izračunavanjem razlika u fazama (interferogram) između dva skupa podataka, mogu se odrediti pomicanja tla koja su se dogodila u vremenu između prikupljanja podataka.

Cilj ovog rada je proučiti potencijal InSAR mjerenja, spoznati načine prikupljanja podataka te obrada istih u programu SNAP (Sentinel Application Platform) te na osnovu teoretskih saznanja analizirati obrađene podatke. Kao područje istraživanja odabrana je nama interesantna zapadna Hercegovina, a vremensko razdoblje je 2020. godina.

## 2. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Preuzimanje snimki je obavljeno preko The Alaska Satellite Facility (ASF, URL 2), institucije za obradu podataka koja je i zemaljska stanica za satelitsko praćenje u okviru Geofizičkog instituta na Sveučilištu Aljaska u Fairbanksu. ASF je razvio i implementirao korisničko sučelje Vertex kako bi istaknuo sadržaj unaprijed obrađene baze podataka ASF DAAC SAR. Vertex je intuitivno korisničko sučelje koje olakšava potragu i vizualizaciju ASF DAAC sredstava baze podataka, isporuku bitnih meta-podataka o snimkama i skupnu isporuku tih ASF podataka (URL 2). Vertex je dizajniran za upoznavanje korisnika sa SAR podacima bez potrebe za bilo kakvim predznanjem o SAR platformama, načinima snopa ili parametrima obrade. Pretraga se obavlja označavanjem područja od interesa te odabirom intervala opažanja, satelitske misije, satelita, tipa podataka, polarizacije, načina prikupljanja i relativnog broja orbite. Vertex nema ograničenja preuzimanja podataka kao što Copernicus Open Access Hub (ESA) ima ograničenje od dvije snimke dnevno. Za potrebe ovog rada korišteni su podaci Sentinel-S1A satelita, s IW načinom prikupljanja i VV polarizacijom te relativne orbite 73 u razdoblju od prvog do dvanaestog

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

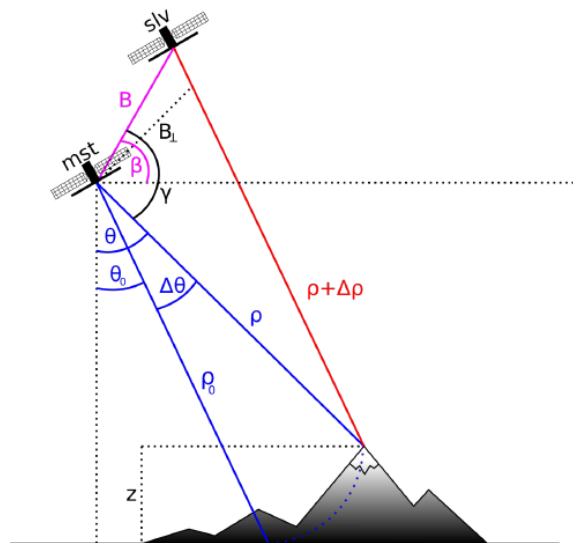
## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

mjeseca 2020 godine. Područje interesa je dio prostora zapadne Hercegovine koje izabrano pomoću rubnih koordinata (slika 1).



Slika 1. Crveni kvadrat označava otisak antene IW načina rada, a žuti kvadrat područje koje će se obraditi u nastavku

Korištene su 24 snimke od 12.1.2020. do 13.12.2020. godine, po dvije snimke mjesečno, minimalni vremenski razmak između većine snimaka je zbog temporalnih pogrešaka 12 dana. Parametri snimaka su prikazani u Tablici 1.  $B_{temp}$  predstavlja podatak koliko je dana prošlo od stjecanja snimke do tzv. glavne snimke koja je u ovom slučaju 10.7.2020.(mst).  $B_{\perp}$  je geometrijska bazna linija, a  $H_{amb}$  je visinski ambiguitet, definiran kao varijacija visine terena koja uzrokuje promjene u fazi od  $2\pi$ . U Tablici 1 je očito da se povećanjem bazne linije smanjiva visinski ambiguitet. Na Slici 2 je prikazana pojednostavljena geometrija satelita u trenutku stjecanja snimki.



Slika 2. Geometrija ponovljenog preleta za izračunavanje pomaka pomoću relativnog položaja senzora. mst i slv su položaji senzora u dvije različite vremenske točke,  $B$  interferometrijska osnovna linija,  $B_{\perp}$  okomita bazna linija,  $\rho$  i  $\rho + \Delta\rho$  udaljenost od cilja  $n$

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

Za potrebe praćenja pomaka poželjnije je da su vrijednosti  $B_{\perp}$  niske jer se smanjuje osjetljivost na topografiju. Dopplerova frekvencija centroida je pomak frekvencije od ciljane točke koja se nalazi u središtu snopa antene. Za idealan SAR sustav, njegova vrijednost treba biti nula, ali se praktički zbog kuta gledanja (eng. look angle) koji nije nula i putanje senzora razlikuje od nule. Razlika u frekvencijama Dopplerovih centroida  $\Delta f_{DC}$  između pojedinih snimki uzrokuje dekorelaciju u smjeru azimuta. Faktor koherencije smanjuje se linearno s povećanjem  $\Delta f_{DC}$  (Hanssen 2001).

Tablica 1. Parametri korištenih snimki

Datum akvizicije	$B_{\perp}$ [m]	Btemp [dan]	Hamb [m]	$\Delta f_{DC}$ [Hz]
12.01.2020.	34,35	18	-462,32	2,62
24.01.2020.	41,10	168	-386,37	-4,36
05.02.2020.	38,94	156	-407,83	1,07
17.02.2020.	-24,07	144	659,72	5,29
12.03.2020.	50,72	120	313,12	0,39
24.03.2020.	6,68	108	-2376,53	-0,84
05.04.2020.	14,71	96	-1079,76	0,73
17.04.2020.	-61,09	84	259,96	-0,94
11.05.2020.	-26,75	60	593,62	1,79
23.05.2020.	-26,53	48	598,47	-1,46
04.06.2020.	80,83	36	-196,47	2,13
28.06.2020.	-30,37	12	522,86	1,01
10.07.2020.(mst)	0,00	0,00		0,00
22.07.2020.	-11,26	-12	1410,83	0,27
03.08.2020.	21,65	-24	-733,65	2,07
15.08.2020.	-72,08	-36	220,30	-1,38
08.09.2020.	-92,37	-62	171,91	-1,00
20.09.2020.	-21,12	-72	752,06	3,01
02.10.2020.	28,91	-84	-549,21	4,72
14.10.2020.	-13,42	-96	1183,60	5,51
07.11.2020.	-55,73	-120	284,97	0,32
19.11.2020.	-61,14	-132	259,72	0,51
01.12.2020.	94,50	-144	-168,04	0,78
13.12.2020.	70,16	-156	-226,35	-1,06

### 3. OBRADA PODATAKA

Obrada snimki je urađena programom Sentinel Application Platform (SNAP). Uputstva i koraci obrade preuzete su iz TOPS Interferometry Tutorial (URL 3), kreiranog od Andresa Brauna sa Sveučilišta u Tübingenu. Koraci obrade se odnose na parove snimaka, što znači da su od 24 snimke kreirana 23 interferograma. Interferogram nastaje unakrsnim umnožavanjem glavne snimke sa srodnom sporednim snimkom. Amplituda obje slike se množi, dok faza predstavlja faznu razliku između dvaju snimaka. Interferometrijska faza svakog SAR slikovnog piksela ovisila bi samo o razlici u putovanjima od SAR senzora do razmatrane ćelije razlučivosti. Sukladno tome, izračunati interferogram sadrži faznu varijaciju  $\phi$  kojoj doprinosi više čimbenika,  $\phi^{flat}$  je faza ravne Zemlje koja je sadržana u mjeranju zbog Zemljine zakrivljenosti i uklanja pomoću DEM-a ( Digitalnog elevacijskog modela),  $\phi^{topo}$  topografske faza ili faza površine reljefa,  $\phi^{disp}$  pomak tla između dvije snimke,  $\phi^{atm}$  doprinos atmosfere faznom signalu,  $\phi^{orbit}$  doprinos zbog promjene orbite platforme i  $\phi^{noise}$  utjecaj faznog šuma. Diferencijalna SAR interferometrija pokušava procijeniti doprinos zemljine površine  $\phi^{flat}$  i  $\phi^{topo}$ , koji se smatra jednakim za obje

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

akvizicije slike i ukloniti ih iz interferograma, tako da se preostale fazne varijacije mogu pripisati promjenama elevacije površine između oba trenutka stjecanja slike (jednadžba (1)).

$$\varphi = \varphi^{\text{flat}} + \varphi^{\text{topo}} + \varphi^{\text{disp}} + \varphi^{\text{atm}} + \varphi^{\text{orbit}} + \varphi^{\text{noise}} \quad (1)$$

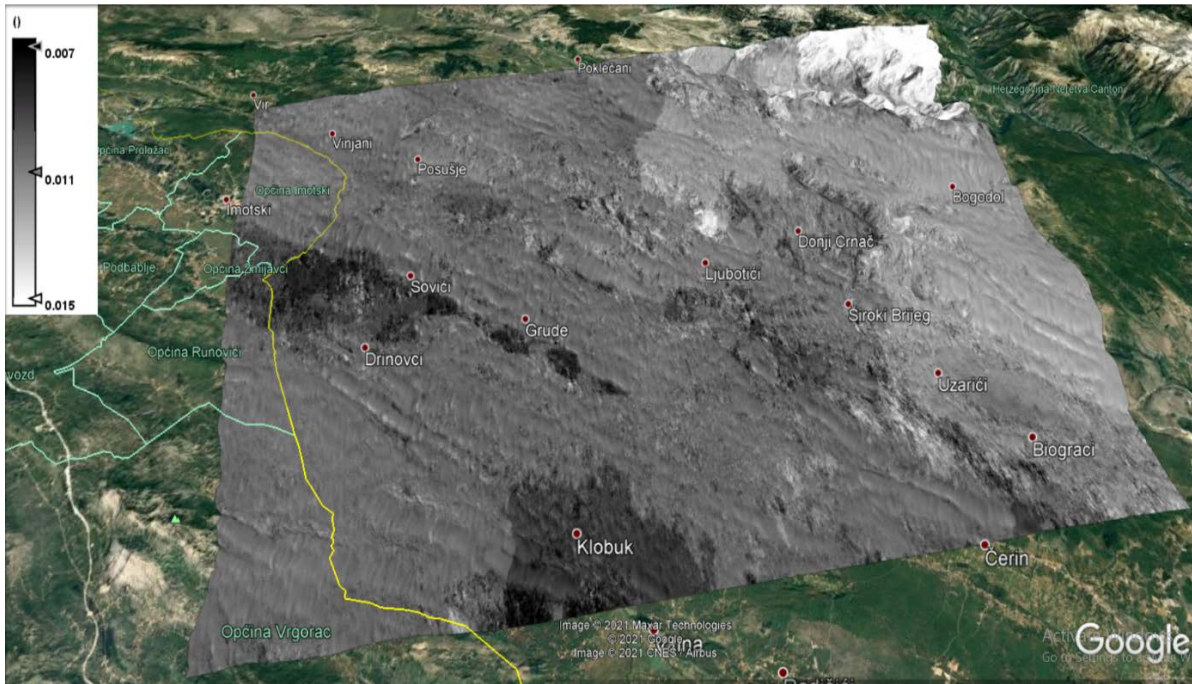
To najbolje funkcionira ako se atmosferski doprinosi i druga buka drže što je moguće manjim jer ih je teško modelirati. Stoga je poželjno koristiti slike iz sušnog doba i s malom okomitom baznom linijom i manjim vremenskim razmacima između snimaka (min. 12 dana). Osim interferometrijske faze, koherentnost između glavne i pomoćne slike procjenjuje se kao pokazatelj kvalitete informacija o fazi. U principu, ona pokazuje imaju li slike velike sličnosti i jesu li stoga korisne za interferometrijsku obradu. Gubitak koherencije može rezultirati lošim interferometrijskim rezultatima, a uzrokovan je vremenskim (preko vegetacije i vodenih površina), geometrijskim (pogreške ili netočnosti u meta-podacima orbite) i volumetrijskom dekorelacijom (potencijalni mehanizmi raspršivanja struktura poput složene vegetacije). Koherentnost se izračunava kao zasebni rasterski pojas i pokazuje koliko je sličan svaki piksel između sporedne i glavne snimke u mjerilu od 0 do 1. Područja visoke koherencije izgledat će svijetla a područja s lošom koherencijom bit će mračna. Kako je primijenjeno uklanjanje topografske faze, interferogram bi nakon toga trebao sadržavati samo varijacije od pomaka, atmosfere i šuma. Koherentnost se prikazuje u skali duginih boja, u rasponu od  $-\pi$  do  $+\pi$ . Uzorci, također nazvani slojnice (eng. fringes) predstavljaju puni  $2\pi$  ciklus i pojavljuju se u interferogramu kao ciklusi proizvoljnih boja, pri čemu svaki ciklus predstavlja polovinu valne duljine senzora. Relativno kretanje tla između dviju točaka dobiva se potom brojanjem slojnica i množenjem s polovicom valne duljine. Što su slojnice gušće, to su pomaci tla veći. Koherentnost pokazuje područja u kojima su podaci o fazi koherentni, što znači da se mogu koristiti za mjerenje deformacija ili topografije (bez uklanjanja topografske faze). Dok su urbana područja i poljoprivredno zemljište prikazani u bijeloj boji i pokazuju visoke vrijednosti koherencije (iznad 0,6), šumska područja su tamna i imaju nisku koherenciju (ispod 0,3). Sukladno tome, fazne informacije o šumskim površinama ovdje nisu korisne. Ako su područja s niskom koherencijom previše dominantna na slici, kasnije odmotavanje faze neće uspjeti i rezultirati će pogrešnim ili slučajnim rezultatima.

## 4. ANALIZA REZULTATA

Za potrebe ovog rada vrijednosti pomaka pojedinačnih interferograma nisu bitni jer vrijede za kratko vremensko razdoblje i opterećeni su atmosferskim pogreškama i pogreškama odmotavanja. Potrebno je 23 proizvoda koji prikazuju pomake u projekciji karte „naslagati“ pomoću opcije programa Create Stack, što kasnije omogućava izračun aritmetičke sredine vrijednosti pomaka piksela za 2020. godinu. Na ovaj način se u dobroj mjeri reduciraju atmosferske pogreške i pogreške odmotavanja faza. Na Slici 3 je prikazan proizvod aritmetičke sredine pomaka nastao obradom vremenske serije podataka za 2020. godinu. Tamniji dijelovi snimke prikazuje mjesta gdje su pomaci jako mali ili zanemarivi, a svijetla gdje su veći pomaci od 1,5 cm. Spomenuti tamniji dijelovi odnose se na obradive površine u blizini Gruda, Drinovaca i Klobuka a bijelo planinsko područje između planina Čabulje i Čvrsnice, gdje su, logično, izmjereni veći pomaci.

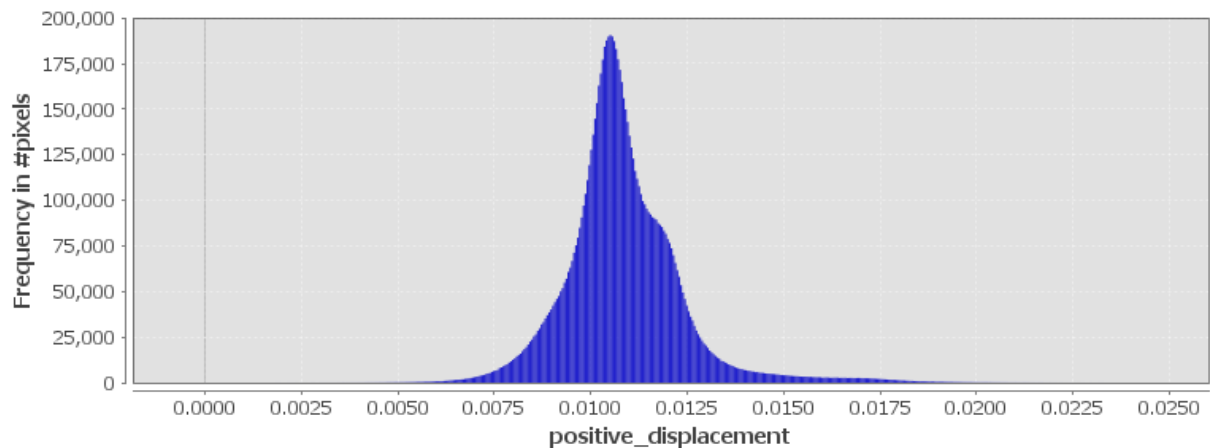
Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima



Slika 3. Prikaz pomaka tla zapadne Hercegovine u Google Earthu za 2020. godinu u metrima

Ukupna statistika je prikazana na Slici 4 kao histogram učestalosti. Vertikalna os predstavlja broj piksela, a horizontalna os vrijednosti vertikalnih pomaka koji su svi manjeg iznosa i pozitivni, što ima smisla s obzirom na geomorfološka i tektonska svojstva zapadne Hercegovine koja je dio karbonatne platforme Dinarida. Tablica 2 prikazuje još statističkih informacija snimke.



Slika 4. Histogram za prosječne pomake test-područja u 2020. godini

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

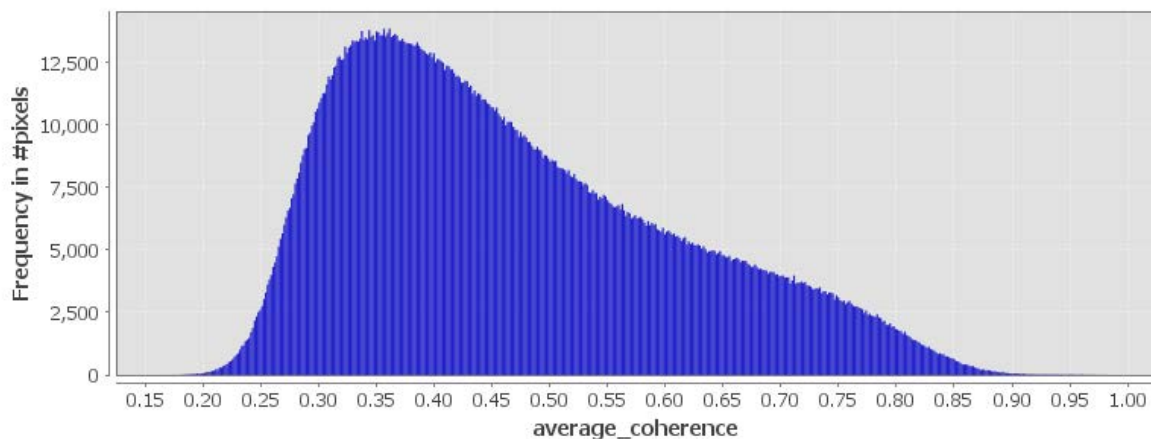
## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

Tablica 2. Tablični prikaz statističkih pokazatelja kvalitete snimke

Ukupni broj piksela	8 934 768
Minimum	0,0000
Maksimum	0,0247
Srednja vrijednost	0,0108
Standardna devijacija	0,0015
Median	0,0107
Koeficijent varijacije	14%
Maksimalna pogreška	0,00002

Prikazan je ukupni broj piksela, minimalna i maksimalna vrijednost pomaka za spomenute piksele, srednja vrijednost ili aritmetička sredina svih pomaka iznosi 11 mm što je više od očekivanog zbog piksela sa većim vrijednostima od 2 cm koje smatramo nepouzdanim, standardna devijacija je 1.5 mm, koeficijent varijacije je omjer standardne devijacije i srednje vrijednosti, ovaj iznos koeficijenta varijacije od 14 % je zadovoljavajući jer skupovi podataka koji imaju koeficijent varijacije preko 30 % se smatraju nepouzdanim.

U ovom radu je korišten veći broj kvalitetnih ulaznih snimaka, te odgovarajuće metode obrade kako bi se postigli zadovoljavajući podaci. Na temelju grafičkih i statističkih pokazatelja te nekih saznanja o reljefu područja koje je korišteno, dobiveni rezultati se mogu smatrati pouzdanim, ali do određene mjere. Jedini način ispravne provjere rezultata je usporedba s terenskim mjerenjima kao što su satelitsko pozicioniranje ili nivelmanska mjerenja. Na kraju se pouzdanost podataka može jedino povećati korištenjem koherencijske maske odnosno uklanjanjem piksela s vrijednošću koherencije manjom od 0,3.



Slika 5. Histogram prosječne koherencije za parove snimaka iz 2020. godine

Na Slici 5 je očito da ipak znatan broj piksela ima koherenciju manju od 0,3, stoga se koristi prag koherencije kako bi grafički odvojili nepouzdanu podatke (Slika 5).

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima



Slika 6. Manje područje snimke nakon primjene koherencijske maske (m)

Na Slici 6 se vidi kako su zadržane vrijednosti pomaka samo za dijelove površine s boljim karakteristikama raspršivača, kao strana brda s manje vegetacije, a mjerenja s više vegetacije ili vodenih površina su izbačeni. Nakon što iz skupa podataka izdvojimo piksele s koherencijom manjom od 0,3 statistički pokazatelji tvrde da se srednja vrijednost vertikalnog pomaka smanjila na 8 milimetara, dok je maksimalna vrijednost 2 cm.

## 5. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući Copernicus inicijativi, te napretku tehnologije i obrade satelitskih sustava, primjena satelitskih podataka u znanstvene svrhe od 2016. godine je doživjela veliki porast. Osim velikog doprinosa Europske svemirske agencije koja je omogućila besplatan pristup podacima, znanstvena zajednica je u zadnjih šest godina uspjela podignuti razinu postojećih metoda i programa te stvoriti nove metode obrade podatka. U ovom radu je korištena deformacijska analiza na osnovu SAR mjerenja, koja su najzanimljivija za geofizičku geodeziju, ali postoji još vrsta satelitskih mjerenja kao što su optička, infracrvena, LiDAR (eng. Light Detection and Ranging) ili gravimetrijska satelitska mjerenja koja mogu biti korisni za geodete. Glavne mane InSAR mjerenja su njihova podložnost atmosferskim pogreškama, nemogućnost rada u realnom vremenu te činjenica što se vrijednosti pomaka odnose na piksele a ne točke, što nije prikladno za određene primjene. Međutim odličan omjer cijene i kvalitete podataka, velika prostorna prekrivenost, sub-centimetarska preciznost čine ovu tehnologiju jednu od najatraktivnijih metoda daljinskih istraživanja.

U ovom radu korištene su 24 snimke iz 2020. godine za područje zapadne Hercegovine, koja je još slabo istraživana u smislu geofizičkih procesa. Analizom rezultata je zaključeno da većina piksela ima pomake u smjeru između senzora i tla  $\pm 10$  mm, no koristeći ovu metodu teško je zaključiti koliki je utjecaj horizontalnih pomaka tla. Dobiveni rezultati o vertikalnom pomaku mogu se objasniti s obzirom na neka osnovna saznanja o geološkim i tektonskim svojstvima promatranog područja ali bez kvalitetnih terestričkih mjerenja teško je doći do apsolutnih zaključaka o pouzdanosti rezultata dobivenih ovim satelitskim mjerenjima. Bolja predodžba geofizičkih procesa se može dobiti koristeći snimke od više godina kao i pažljivim



Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

## Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima

biranjem snimaka s boljom koherencijom. Na smanjenje kvalitete snimaka u ljetnom razdoblju, zbog visokih temperatura i kamenog pokriva zapadne Hercegovine, znatno utječu atmosferske pogreške. Optimalno bi bilo uz posjedovanje terestričkih mjerenja isprobati druge algoritme kao što je PS-InSAR (eng. Persistent Scatterers InSAR), koji se oslanja na stalne raspršivače PS (eng. Persistent Scatterer), piksele s konzistentnim svojstvima raspršenja i SBAS (eng. Short BAseline Subset), te općenitiji pristup koji koristi piksele s raspodijeljenim raspršivačima DS (eng. Distributed Scatterers), te tada usporediti rezultate.

Kako metode i algoritmi obrade podataka zadnjih godina postaju sve automatiziraniji i jednostavniji za korištenje, za očekivati je da će se taj trend nastaviti idućih godina.

## LITERATURA

1. Andrade, E.: Doppler and the Doppler effect. *Endeavour* 18 (69), 14–19., 1959.
2. Benallegue, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D. & Normand, M.: The use of radar backscattering signals for measuring soil moisture and surface roughness. *Remote Sensing of Environment* 53 (1), 61–68., 1995.
3. Bender, J.: InSAR vremenski nizovi u praćenju vertikalnih pomaka Zemljine kore, diplomski rad, Geodetski fakultet, Zagreb, 2018.
4. Braun, A.: Radar satellite imagery for humanitarian response - bridging the gap between technology and application. Tübingen: University of Tübingen, 2019.
5. Cindrich, I., Marks, J. & Klooster, A.: Coherent optical processing of Synthetic Aperture Radar data. In: Vatz, B. W. (Ed.): *SPIE 0128. Effect Utilization of Optics in Radar Systems*, 27 September 1977, Huntsville, 128–143., 1977.
6. Daida, J. M., Onstott, R. G., Bersano-Begey, T. F., Ross, S. J. & Vesecky, J. F.: Ice roughness classification and ERS SAR imagery of Arctic sea ice: Evaluation of feature-extraction algorithms by genetic programming. In: *IGARSS 1996. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 27-31 May 1996, Lincoln, NE, USA, 1520–1522., 1996.
7. Derooin, J.-P., Company, A. & Simonin, A.: An empirical model for interpreting the relationship between backscattering and arid land surface roughness as seen with the SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (1), 86–92., 1997.
8. Dong, Y., Forster, B. C. & Ticehurst, C.: Radar backscatter analysis for urban environments. *International Journal of Remote Sensing* 18 (6), 1351–1364., 1997.
9. Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D.: *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, 2007.
10. Gatelli, F., Guamieri, A. M., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C. & Rocca, F.: The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (4), 855–865., 1994.
11. Gauthier, Y., Bernier, M. & Fortin, J.-P.: Aspect and incidence angle sensitivity in ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 19 (10), 2001–2006., 1998.
12. Hanssen, R. F.: *Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media, 2001.
13. Hooper, A., Segall, P., Zebker, H.: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 112: B07407., 2007.
14. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B.: A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23)., 2004.

Vrankić, M., Grgić, M., Bašić, T.

**Praćenje geofizičkih procesa na području zapadne Hercegovine satelitskim opažanjima**

---

15. Höser, T. Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring. Master's Thesis, Department of Geography, University of Bonn, Bonn, Germany, 2018.
  16. Massonnet, D., Feigl, K. L.: Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500., 1998.
  17. Massonnet, D., Souyris, J. C.: *Imaging with synthetic aperture radar*. CRC Press, 2008.
  18. Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C. et al.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* 364, 138–142, 1993.
  19. Richards, J. A.: *Remote sensing with imaging radar*, Heidelberg, New York: Springer, 2009.
  20. S. L. Ullo et al.: "Application of DInSAR Technique to High Coherence Sentinel-1 Images for Dam Monitoring and Result Validation Through In Situ Measurements," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 3, pp. 875-890, March 2019.
  21. Šiško, J.: *Obrada satelitskih SAR podataka*, diplomski rad, Geodetski fakultet, Zagreb, 2017.
  22. Skolnik, M. I.: *Introduction to radar systems*, 2nd edn. McGraw-Hill, Boston, Mass, 1980.
  23. van Zyl, J., Chapman, B. D., Dubois, P. & Shi, J.: The effect of topography on SAR calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 31 (5), 1036–1043., 1993.
  24. Warren, S., Hahn, C., London, J., Chervin, R. & Jenne, R.: *Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land*. UCAR/NCAR, NCAR Library, 1986.
- POPIS URL-ova
- URL 1. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (24.5.2021.)
- URL 2. <https://asf.alaska.edu/> (24.5.2021.)
- URL 3. <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/> (23.4.2021.)
- URL 4. <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (28.6.2021.)