

# Određivanje površinskih pomaka tla uz pomoć InSAR Sentinel-1 satelitskih podataka

---

**Bočkor, Mario**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:775480>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-04**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**ODREĐIVANJE POVRŠINSKIH POMAKA TLA UZ POMOĆ INSAR  
SENTINEL-1 SATELITSKIH PODATAKA**

Diplomski rad

Mario Bočkor

R269

Zagreb, 2021.

## ODREĐIVANJE POVRŠINSKIH POMAKA TLA UZ POMOĆ INSAR SENTINEL-1 SATELITSKIH PODATAKA

MARIO BOČKOR

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Rad obuhvaća opću problematiku primjene geodetske tehnologije i tehnike poznatu kao radar. Utvrđuje se uloga umjetnih satelita sa SAR radarskom tehnologijom i njihova primjena u interferometriji odnosno mogućnost primjene proizvoda snimanja Sentinel-1 misije. Temelj istraživanja ovog rada je uočavanje deformacija uzrokovanih potresom na području Zagreba 22.3.2020. Obrađivani podaci su dobiveni snimanjem istražnog područja Sentinel-1A i B satelitima, a sama obrada je provedena pomoću SNAP-u softverskog programa koji je izrađen za tu namjenu. Obrada snimaka se provodi u SNAP softveru kroz 4 faze. Proces obrade podataka podrazumijeva korištenje SNAP operatera čija je namjena opisan te su analizirani produkti obrade. Kao rezultat konačne obrade dobivena je maska deformacija istražnog područja koja se implementira u Google Earth u svrhu utvrđivanja područja s najizraženijim deformacijama tla.

Ključne riječi: Sentinel-1, SAR, interferometrija, SNAP, koherenca

Završni rad sadrži: 48 stranice, 0 tablica, 26 slika, 1 priloga i 17 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Ivan Medved, docent RGNF  
Dr. sc. Ime Prezime, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Ivan Medved, docent RGNF  
Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

**DETERMINATION OF SURFACE SHEET DISPLACEMENTS USING  
INSAR SENTINEL-1 SATELITE DATA**

MARIO BOČKOR

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Institute of Geophysical Exploration and Mine Surveying  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This paper covers the general issues of application of geodetic technology and techniques known as radar. The role of artificial satellites with SAR radar technologies is being determined and their application in interferometry, i.e. the possibility of using Sentinel-1 mission product. The base line of this research is observation of deformation caused by the earthquake in area of Zagreb on March 22, 2020. The processed data of exploration area is obtained by Sentinel-1A and B satellites recordings. Processing of it was done by using a SNAP software that is special designed for that purpose. Image processing is performed in SNAP software through 4 phases. The data processing implies to the use of SNAP operators whose purpose and products are described through the paper. As a result of the final processing, a deformation mask of the exploration area is made. Mask is implemented in Google Earth with purpose of determination of expressed soil deformation in the area.

Keywords: Sentinel-1, SAR, interferometry, SNAP, coherence

Thesis contains: 48 pages, 0 tables, 26 figures, 1 appendixes and 17 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Ivan Medved, Assistant Profesor  
Associate Professor Name Surname, PhD

Reviewers: Assistant Profesor Ivan Medved, PhD  
Associate Professor Jasna Orešković, PhD  
Assistnat Profesor Tomislav Korman, PhD

## **ZAHVALE**

*Iskreno se zahvaljujem ponajprije svome mentoru doc.dr.sc. Ivanu Medvedu koji mi je omogućio izradu ovoga rada te mi uvelike pomogao svojim savjetima, trudom i uloženom vremenu kako bi mi prenio svoje znanje.*

*Također se zahvaljujem i svojim roditeljima, obitelji i prijateljima koji su mi bili velika potpora i motivacija kroz cijelo moje školovanje i pomagali mi kada je to najviše bilo potrebno.*

*Veliko hvala svima i SRETNO!*

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	1
1. UVOD .....	1
1.1. Razvoj radarskih sustava .....	2
2. INSAR TEHNOLOGIJA .....	4
2.1. RADAR .....	4
2.2. SAR.....	6
2.2.1. Mjerenje SAR tehnikom .....	10
2.2.2. Način snimanja SAR-om .....	12
2.2.3. TOPSAR .....	13
2.3. InSAR .....	14
2.4. Sentinel-1 .....	16
2.5. Sentinel-1 proizvodi.....	17
3. KORIŠTENI SUSTAV .....	19
3.1. SLC - Single look complex.....	19
3.2. Karakterizacija SAR slike.....	20
3.3. Ograničenja snimanja .....	21
4. PODACI I OBRADA PODATAKA .....	24
5. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA .....	31
6. ZAKLJUČAK .....	38
7. LITERATURA .....	39
8. WEB LITERATURA .....	40

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Monostatski radar (Hrvatska enciklopedija 2021.).	6
Slika 2.2 Koncept SAR-a (Ulaby i Long 2014.).	8
Slika 2.3 SLAR tehnika (Ulaby i Long 2014.).	10
Slika 2.4 Cvrkut (Strickland i Mourou, 1985.).	12
Slika 2.5 Trakasta slika, SM model (Morier i dr. 2013.).	13
Slika 2.6 InSAR princip mjerenja (Düzgün i Demirel, 2011.).	14
Slika 2.7 Level-1 Tok obrade prema De Zan i Guarnieri, 2006.	18
Slika 3.1 Sinusoida (Esutorij 2021.).	20
Slika 3.2 Geometrijski poremećaji SAR slike uzrokovani oblikom i rasporedom terena (Researchgate 2021.).	22
Slika 3.3 Efekt snijega (eng. spackle effect) (Researchgate 2021.).	23
Slika 4.1 Radno sučelje Copernicus Open Access Hub-a, prikaz RH.	24
Slika 4.2 SNAP-u dijagram toka: Pred obrada.	25
Slika 4.3 Dijagram toka: Drugi stupanj obrade, SNAP-u.	25
Slika 4.4 Treći stupanj - SNAP dijagram toka.	27
Slika 4.5 Operateri četvrtog stupnja obrade SNAP i SNAPHU (KARADIMOU 2020.).	29
Slika 4.6 Princip odmatanja faze.	29
Slika 5.1 Intenzitet slike Sentinel-1A	31
Slika 5.2 Produkti: intenzitet (gornja), interferometar (srednja), koherentnost (donja).	32
Slika 5.3 Histogram interferograma (lijevo) i koherentnosti (desno).	33
Slika 5.4 SNAP proizvodi: Interferogram (lijevo) i koherentnost (desno).	33
Slika 5.5 SNAP proizvodi: Intenzitet (lijevo) i topografska faza (desno).	34
Slika 5.6 SNAP proizvodi: Interferometrijska razlika faza (lijevo) i faza (desno).	34
Slika 5.7 Obrada podataka Range Doppler Terrain Correction operaterom.	35
Slika 5.8 Maskiranje podatka pomoću Stack operatera.	35
Slika 5.9 Implementacija maske na području grada Zagreba u Google Earth softverskom programu.	36
Slika 5.10 Implementacija maske na šire područje u Google Earth softverskom programu.	36

## **POPIS PRILOGA**

Prilog 1 Predložak omota za CD



## 1. UVOD

Radari kao sredstvo istraživanja su vrlo složeni sustavi sa nizom prednosti, ali i mana. Radar je zajednički naziv za tehniku i tehnologiju koja se danas primjenjuje u raznim djelatnostima kao što je vojska, promet i znanost. Može se reći da je radar postao neizostavno sredstvo modernog društva. Razvoj geodetske tehnologije omogućio je uporabu radara u obliku umjetnih satelita što je doprinijelo istraživanju na globalnoj razini. Također boljem razumijevanju raznih prirodnih procesa kao što su klimatske promjene, kretanje ledenjaka, razvoj ciklona, procesa deformacija Zemljine površine i dr. Površinski pomaci na lokalnoj, regionalnoj ili globalnoj razini oduvijek su tema brojnih istraživanja, a kontinuirano praćenje deformacija omogućila je moderna SAR tehnologija. Prikupljanje geoprostornih podataka provodi se pomoću raznih satelita, a jedna od važnijih satelitskih misija je Sentinel-1. Misija se sastoji od dva satelita blizanca (Sentinel-1A i B) koji obuhvaćaju područje interesa, Hrvatsku tj. Zagreb. Područje istraživanja je odabrano s obzirom na svoju seizmičku aktivnost tokom 2020. godine te zbog dobrog omjera pokrivenosti urbanim i vegetacijskim pokrovom što ga čini vrlo zanimljivim za ovaj oblik ispitivanja. Sentinel-1 misija je pokrenuta sa idejom istraživanja površinskih deformacija pa s toga sateliti i sadrže SAR opremu prigodnu za ovaj tip istraživanja. Istraživanje obuhvaćeno ovim radom je provodano pomoću prikupljenih podataka Sentinel-1 misije, a obrada tih podataka pomoću SNAP softvera. SNAP pruža set alata pomoću kojih se provodi intrferometrijska analiza iz čijeg se prikaza (interferometra) iskazuju područja deformacija i intenzitet. Uzroci deformacija mogu biti antropogen utjecaji i prirodni procesi kao što su klizanja, tektonski pokreti, potresi i dr.

## 1.1. **Razvoj radarskih sustava**

Razvoj geodezije u posljednjih nekoliko desetljeća omogućio je istraživanja globalnih razmjera. Razvoj je omogućio proširenje područja na kojemu je moguće vršiti mjerenja i to uz pomoć umjetnih satelita. Uporaba satelita doprinijelo je razvoju globalnih referentnih sustava te omogućila kartiranje širokog područja na Zemlji što smatramo prvom etapom razvoja. Daljinska istraživanja utjecala su na ubrzani razvoj geodezije, osobito stereografskih tehnika, a pozicioniranje prostornih točaka došlo je na novu razinu uporabo globalnog navigacijskog sustava (GNSS) (McCarthy, 1996.).

Druga etapa razvoja usmjerena je na karakterizaciju Zemljine dinamike od kojih su najviše obuhvaćeni tektonski pomaci globalnih razmjera. Proučavanje takvih poremećaja bazira se na mjerenju funkcije vremena koje su potkrijepljene i definirane referentnim sustavima. Oduvijek je postajao značajan interes u praćenju strukturnih deformacija u litosferi kao što su potresi, vulkanizmi kao i drugih antropogenih deformacija te pojave i praćenje kretanja ledenjaka. Interes u ovome području pojavio se upravo zbog boljeg razumijevanja ovih globalnih poremećaja, ali i regionalnih. Istraživanja i prepoznavanja rudnih ležišta, geotermalne energije te vode samo su neka od mogućnosti koje nam omogućuje ova metoda. U svrhu boljeg razumijevanja spomenutih procesa potrebno je vršiti učestala mjerenja visoke točnosti i visoke prostorne rezolucije. Ostvarivanje tih zahtjeva opravdano je i praćenjem mogućih opasnosti, procjenom javne sigurnosti, utjecajem globalnog zatopljenja i njegovih posljedica kao što je porast razina mora. Proučavaju se i konzervativna problematika kao što su podzemna odlagališta nuklearnog otpada u kojem geodetska praćenja imaju značajnu ulogu u prikazivanju i osiguravanju ključnih informacija kao podloge za geofizičke interpretacije (Hanssen, 2002.).

Treću etapu obilježava točnost geodetskih mjerenja što je postignuto povećanim brojem „alternativnih“ tehnika. Kvaliteta u smislu preciznosti i pouzdanosti se prilagođava specifičnim potrebama i ciljevima pojedinog mjerenja. Mogućnost ostvarivanje tih ciljeva ima razna ograničenja kao što su financijska, pristupačnost mjernog područja, vrijeme provođenja, obilježja mjerenog područja i ponovljivosti mjerenja. Svemirski-geodetski podaci, gravimetrijski i geometrijski doprinose istraživanjima u području geofizike, geodinamike i oceanografije te neizmjereno utječu na opažanja u meteorologiji i atmosferskoj fizici. Na primjer promjene u atmosferi uzrokuju „lom“ u brzini širenja elektromagnetskih

valova koja je ujedno i jedna od najvažnijih i najelementarnijih uzroka šuma pri mjerenju udaljenosti. Danas korištene svemirsko-geodetske tehnologije kao što su osnovna interferometrija (VLBI), radarska altimetrije i globalni navigacijski sustavi poput GPS-a nisu osmišljene za proučavanje atmosfere, ali doprinijele su njezinom razumijevanju. Uporaba GPS sustava naročito je primjenjiva u meteorologiji gdje se sustav koristi za utvrđivanje količina vodene pare u dijelovima atmosfere. Radarska interferometrija ima široku primjenu u geodeziji gdje se kombiniranjem karakteristika slika velikih razmjera služe za kvantitativna promatranja udaljenosti i kutova. Svemirski radarski interferometri mogu prikupiti opažanja raspoređena po cijeloj Zemlji, a danas se prikupljaju na širini otkosa reda veličine 100-500 km te razlučivošću od oko 20 m. Za razliku od optičkih senzora, aktivna radarska opažanja omogućila su prikupljanja i noću na područjima s ograničenim kontrastom čak i kroz naoblaku. Uporaba ove tehnologije može ostvariti točnost mjerenja nadmorske visine od oko 6 m. Najznačajniji doprinos u istraživanju je u promatranju dinamičkih procesa što omogućuje tehnikom višestrukog ponavljanja. To se postiže snimanjem dvaju radarskih snimki višestrukim prijelazom satelita iznad istog područja. Za ostvarivanje povećane frekventnosti snimanja odnosno vremenske razlike ponovljenog intervala snimanja koriste dva satelita na istim orbitama (Hanssen, 2002.).

Deformacija Zemljine površine promatra se kao dio valne duljine radarske snimke koja rezultira točnošću ispod 1 cm radarske vidljivosti. Najstrožih zahtjeva za ovu primjenu su da spremljeni radarski podaci sadrže akvizicije prije pojave deformacija. Primjenom tehnologije uočava se niz prednosti, ali se prepoznao i niz ograničenja koji utječu na primjenjivost i točnost rezultata interferometrije. Proveden je niz studija koje razmatraju izvore pogrešaka i njihovo širenje od početnog do konačnog dobivenog parametra. Za ovaj problem posebno su važni rezultati ESA-e pod nazivom „ERS tandem misija“ koja je omogućila iznimno koherentne interferometrijske podatke višestrukog prijelaza te time omogućila opsežnu bazu podataka "atmosferskih" interferometrijskih produkata iz kojih su u suradnji s meteorolozima prepoznao izvorom pogreške u studijama deformacija. Ukazana pogreška je analizirana i protumačena kao bitan izvor informacija za atmosferska istraživanja te rezultirala uporabom interferometrijskih podataka kao korektivnih podataka u poboljšanju stohastičkih modela za utjecaj atmosfere na svemirsko-geodetske tehnologije poput GPS-a, radarske altimetrije ili VLBI-a naročito u pogledu prostornih smetnji manjeg opsega (Kramer, 2002.).

## 2. INSAR TEHNOLOGIJA

### 2.1. RADAR

Naziv radar je zajednički naziv za uređaj i tehniku koja se kod tih uređaja koristi. Radari su elektronički uređaj pomoću kojih se određuju udaljenosti, azimuti, elevacije i brzine pojedinih objekata. Navedeni parametri se određuju na temelju emisije elektro magnetnih valova te refleksije od promatranog objekata. H.R. Hertz je eksperimentalno testirao 1888. godine J. C. Maxwellovu elektromagnetsku teoriju (postavljenu 1864. godine) s rezonatorima i dokazao da se odbijanja od različitih metalnih i nemetalnih objekata doista mogu detektirati. Prvi radarski uređaj izradio njemački izumitelj Christian Hülsmeier početkom 19. stoljeća koji ga je koristio za detektiranje brodova (Ulaby i David, 2014.).

Prvi uređaj koji možemo poistovjetiti sa današnjim radarima izradio je Robert Watson-Watt 1935. Od prve kreacije radara pa sve do danas oni nam omogućuju otkrivanje objekata u uvjetima loše i smanjene vidljivosti, npr. u mraku, kroz dim, maglu, kišu ili snijeg. Elektromagnetski valovi šire pravocrtno zbog čega je i moguća primjena u takvim uvjetima unatoč tome domet radara ograničen je zakrivljenošću Zemljine površine. Jedino radari koji koriste refleksiju valova na ioniziranim slojevima atmosfere imaju veći domet i do više tisuća kilometara (Hrvatska enciklopedija 2021.).

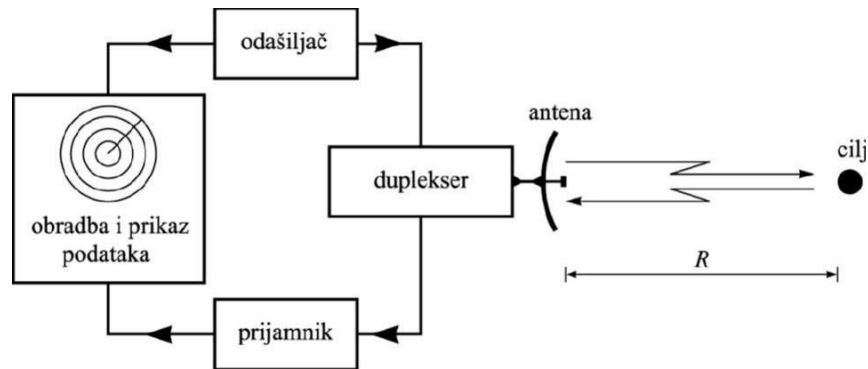
Radarski uređaj emitira elektromagnetske impulse u radijskom i mikrovalnom režimu i detektira refleksije tih impulsa od objekata u vidnom polju. Radarska tehnika koristi dvosmjerni vremenski interval putovanja, odnosno impuls za određivanje dometa do detektiranog objekta i intenziteta njegovog povratnog raspršivanja. Iz intenziteta povratnog signala mogu se dobiti fizičke veličine poput hrapavosti ili veličine površine. Za daljinska istraživanja koriste se dvije vrste radara sa slikom i bez slikovnog prikaza (Ulaby i Long 2014.).

Radari sa snimkama poznati su pod nazivom SLAR (side-looking airborne radars), odnosno radari za bočna snimanja iz zraka. Koriste se dva tipa SLAR radara: SLAR s otvorenom blendom i radar sa sintetički otvorenom blendom (SAR). Navedeni tipovi radara razlikuju se obzirom na način obrade signala Doppler spektra. Ciljevi oba sustava (SLAR i SAR) je generiranje karata ili slika iz povratnog spektra radarski osvjetljenog područja. Usporedno sa radiometrijskim sustavima može se reći da su radarski sustavi značajno složeniji zbog

dodatnih odašiljača. Unatoč tome složeni sustavi omogućavaju dodatnu fleksibilnost prilikom modulacije prijenosnih signala te omogućuje modulaciju Doppler obradu primljenog signala. Radarski prijammnici primarno su dizajnirani za prijam reflektiranog signala i u pravilu ne moraju biti „osjetljivi“ kao šta je to praksa kod radiometrijskih prijammnika. U pravilu razina prijenosne snage može biti dovoljno velika da se i prilično „bučni“ prijammnici mogu koristiti bez pogoršanja interpretiranog rezultata. Najčešći objekt snimanja je Zemljina površina stoga se pokušava snimkom (produktom) obuhvatiti čim šire područje. Amplituda primljenog radarskog signala proporcionalna je koeficijentu raspršenja ciljnog područja, koji ovisi o upadnom kutu, učestalosti rada (periodu) i stanjima polarizacije odašiljačke i prijemne antene. Uočeno je da je varijacija koeficijenta raspršenja s upadnim kutom različita za različite vrste snimanih objekata. Pa se koriste u analizi snimljenih objekata i njihovim identifikacijama. Pomoću satelita i njegovih radarskih snimki omogućeno je mjerenje raspršenja pod jednim upadnim kutom sa svake strane (Hanssen, 2002.).

Višestrukim prijelazom preko istog područja duž različitih linija letenja ili na različitim nadmorskim visinama mogu se dobiti informacije o promjeni raspršenja upadnog kuta. Postoje i posebno dizajnirani radari koji su dizajnirani za prikupljanje ovog tipa podataka korištenjem jednog ili više snopova usmjerenih ispred ili iza putanje satelitske platforme. Kod takvih tipova radara koeficijent raspršenja moguće je mjeriti kontinuirano pod različitim kutovima prilikom jednog prelaska radara. Pojedini objekti mogu se identificirati ili mapirati prema svojem karakterističnom obliku, teksturi i/ili kontekstu slike. Iako varijacije u amplitudnim razlikama između različitih klasa su od bitne važnosti kod snimanja ciljanih objekata ukoliko se determiniranje vrši pomoću oblika, teksture i dodatnih parametara nije nužno vršiti preciznu kalibraciju amplituda. Stoga primjena nekih radara ne zahtjeva točnu kalibraciju što pojednostavljuje njihov dizajn. S druge strane analiza geofizičkih parametara zahtjeva radarske snimke visoke točnosti i kalibrirane na apsolutnoj ili relativnoj osnovi (Hanssen, 2002.).

Razlikujemo dvije vrste radara su monostatski i bistatički. Monostatski radar (**Slika 2.1**) koristi se samo jednu antenu za odašiljanje i za primanje signala dok s3 kod takozvanog bistatičkog radara odašiljač i prijemna antena fizički odvojene (Skolnik, 1962.).



**Slika 2.1** Monostatski radar (Hrvatska enciklopedija 2021.).

Radarom se možemo odrediti: smjer (prema usmjerenju antene), udaljenost (mjeranjem vremena povratka emitiranog signala), brzinu (mjeranjem Dopplerov pomak odjeka), prosječnu vrijednost radarskog raspršenja (usporedbom energije povratka odjeka s energijom emitiranog signala). Osnovni dijelovi standardnog radarskog sustava (**Slika 2.1**) uključuju (Ulaby i Long, 2014.):

- Radio odašiljač koji se koristi za proizvodnju signala koji se emitira putem odašiljačke antene. Signal putuje do ciljanog objekta gdje se reflektira ili raspršuje natrag do prijamne antena (prijamnika) koji spaja raspršeni val u sklopovima.
- Prijamnik pojačava odjeknuti signal, a zatim ga obrađuje kako bih se izdvojile tražene značajke.
- Procesor provodi neku vrstu korelacije između odašiljača da bi se mogla provesti usporedba karakteristika emitiranih i prikupljenih signala.

Mnogi radari jedna se antena koristi za prijenos i prijem signala. U tom slučaju je potrebna neka vrsta odašiljačko-prijemnog prekidača (T/R prekidač) za izmjenu svojstva antene u odašiljač odnosno prijamnik (Ulaby i Long, 2014.).

## 2.2. SAR

Radari sa sintetskom antenom (SAR) služe za promatranje površine Zemlje ili drugih planeta, a njima prikupljeni podatci nalaze primjenu u agronomiji, šumarstvu, rudarstvu, arheologiji, meteorologiji, geografiji, oceanografiji, ekologiji, razminiranju, astronomiji itd. Njihova je antena postavljena na pokretni objekt (zrakoplov, satelit, upravljivi balon) koji se kreće konstantnom brzinom iznad ili uzduž promatranoga područja (Hrvatska enciklopedija, 2021.).

Sateliti opremljeni sa SAR instrumentima lete sinkrono sa suncem blizu polarnih orbita na visini od 400 do 1000 km. Ovisno o smjeru leta sateliti mogu letjeti u izlaznoj ili ulaznoj orbiti prema Sjevernom ili Južnom polu. Različiti smjerovi orbita omogućuju SAR-u da snimi Zemljinu površinu iz drugih kutova „gledanja“ čime se osigurava potpuna prekrivenost područja i ublažava se foreshortening efekt, layover efekt i efekt sjene (Hanssen, 1996.).

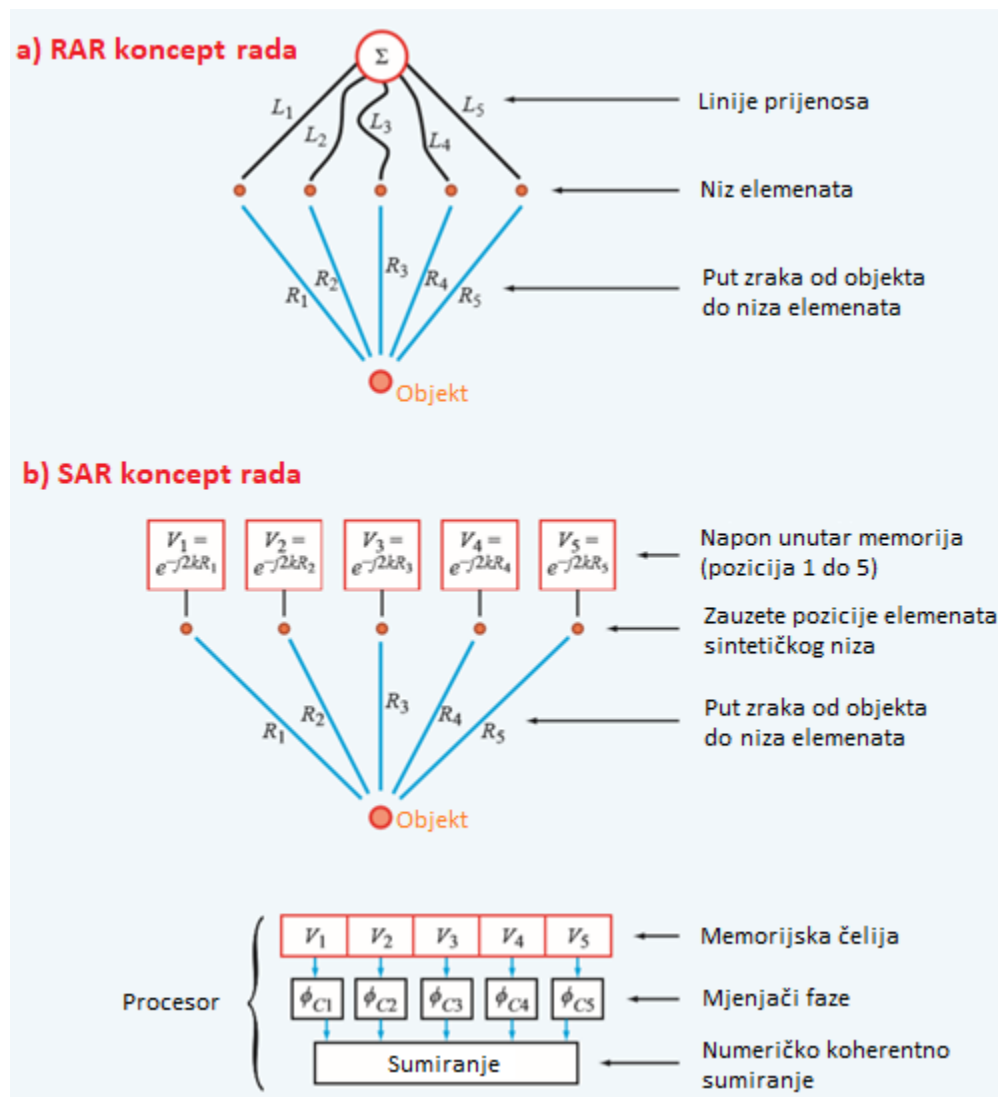
Računalnom obradom podataka prikupljenih promatranjem u više uzastopnih položaja antene dobiva se slika promatranoga područja visoke razlučivosti koja djeluje kao da je dobivena antenom znatno većih dimenzija od stvarne antene. Virtualna antena je rezultat računalne obradbe po čemu je i SAR radar dobio taj naziv (Hrvatska enciklopedija, 2021.).

Sustav radara na daljinsko upravljanje koristi elektromagnetsku (EM) emisiju u mikrovalnom spektru (u rasponu valne duljine od 1 mm do 1 m te frekvencije od 300 MHz do 300 GHz) kako bi se ustvrdila udaljenost između radarske antene i snimanog objekta. U praksi se najčešće koriste monostatske radarske antene koje su sposobne emitirati i prikupljati radarske signale. SAR satelit se može kategorizirati u tri grupe na osnovu najčešće upotrebljivanih valnih duljina. Najčešće upotrebljavane band frekvencije su: X-band (12 - 7,5 GHz, 2,5 - 4 cm), C-band (7,5 - 3,75 GHz, 4 - 8 cm) i L-band (2 - 1 GHz, 15 - 30 cm). Valna duljina definira level raspršenja i osjetljivost, sposobnost detekcije deformacija. Kod satelitskih misija C-band se najčešće primjenjuje i to u svrhu detekcije i praćenja geofizičkih fenomena. X-band pronalazi široku primjenu u urbanim područjima zbog svoje osjetljivosti na jako male pomake, a L-band pronalazi primjenu u područjima s puno vegetacije jer ima sposobnost prodiranja zraka kroz vegetacijski pokrov do površine terena (Hanssen, 1996.).

SAR tehnika može biti jedno prolazna i više prolazna zavisno o broju prijelaza snimke istog području tokom jednog intervala. SAR radar snima poprečno u smjeru putanje satelita ili u smjeru uzduž putanje. Kodirane oblike valova koriste se za postizanje dobre razlučivosti snimke u poprečnom smjeru putanje, a uzduž nje kako bih se obuhvatilo čim veće područje koristi sintetsku antenu čime se dobiva dobra rezolucija (Skolnik, 1962.).

Višekanalni SAR koji vrše istodobna (ili gotovo istodobna) mjerenja pri različitim polarizacijama poznati su kao quad-pol ili polarimetrijski SAR. Tehnologija se temelji na

kretanju radarske antene iznad nepokretnog snimanog područja. Inverzni SAR fiksira radar na mjestu i mijenja ciljani objekt. Tijekom rada SAR-a impulsi se emitiraju i prikupljaju dok radar prelazi preko ciljanog područja. Prema SAR konceptu iz 1960. (Slika 2.2) sa objektnim fokusom razlika između antene s fokusom i one bez njega uobičajeno je u tome što se kod ne fokusirane antene preneseni emitirani snop paralelnih (koliko je to moguće) zraka. Pa se i kod prijama povratnog snopa očekuju paralelne zrake (Ulaby i Long 2014.).



Slika 2.2 Koncept SAR-a (Ulaby i Long 2014.).

SAR uobičajeno ima otvor blende koji je toliko dugačak da snop mora biti fokusiran na točku na kojoj se nalazi objekt slično fotoaparatu kojemu leća mora biti fokusirana na ciljani objekte da i se dobio željeni prikaz. Prema analogiji s kamerom može se reći da je u sustavima s realnim otvorom blende (RAR) antena (leća) fokusirana u beskonačnost, a kod SAR sustava je niz antena (objektiv) fokusiran na obližnji objekt. Niz od 5 antenskih elemenata fokusiranih na objekt T zorno prikazuje RAR koncept (Slika 2.2 a)). Svaki



element u nizu povezuje se sa „točkom sumiranja“ gdje se iz svih elemenata sumiraju naponi. Duljine vodiča koji povezuju svaki od elemenata s točkom sumiranja temelje se na udaljenosti do objekta i položaju određenog elementa u nizu. To znači da ukupna udaljenost od objekta do točke sumiranja mora biti ista za svaki element, što se iskazuje pomoću jednadžbe (Ulaby i Long 2014.):

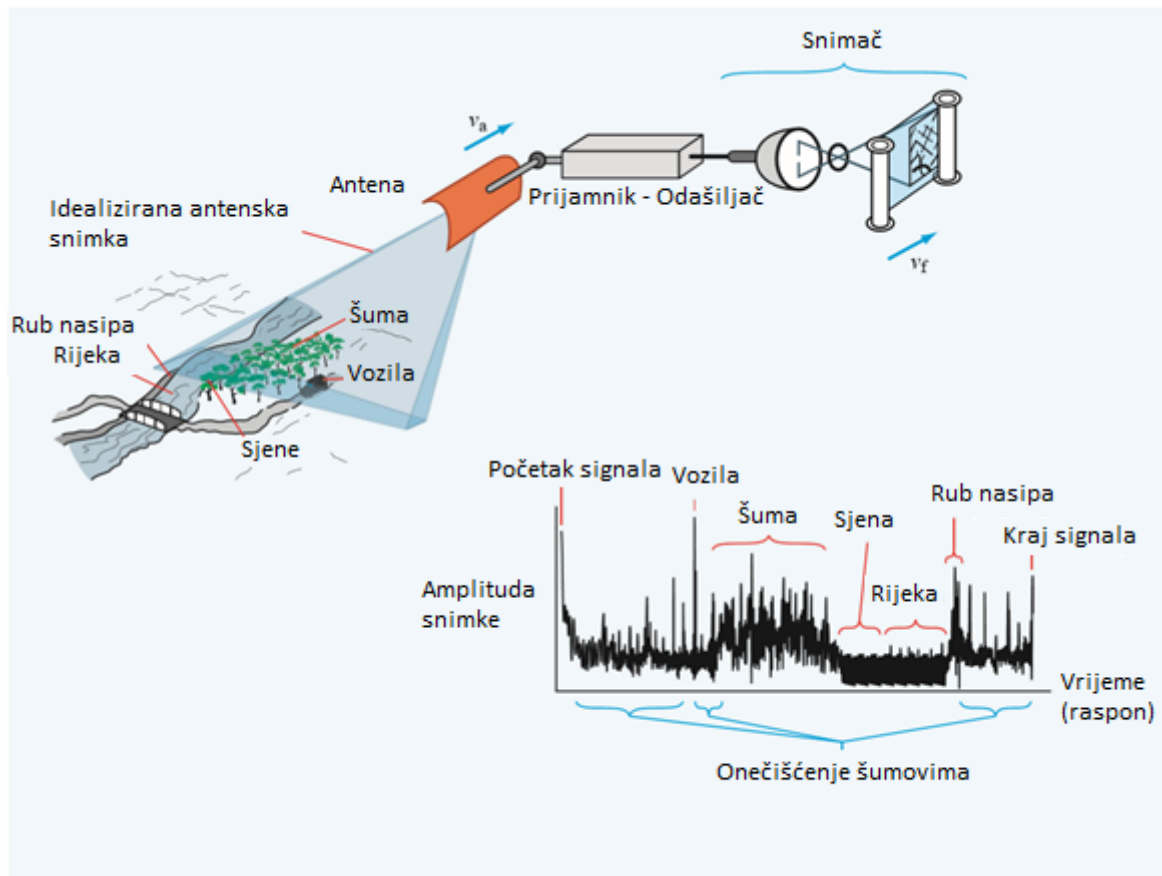
$$L_1 + R_1 = L_2 + R_2 = L_3 + R_3 = L_4 + R_4 = L_5 + R_5 \quad (2.1)$$

Prema jednadžbi (2.1) duljine  $L_i$  su "ekvivalentne duljine slobodnog prostora" vodiča tj. duljina linije odabire se tako da vremensko kašnjenje signala u vodičima odgovara vremenu putovanja vala u prostoru. Prilikom prijenosa svi signali imaju isto ishodišno mjesto koje je sumarna točka za prijem tako da je pri faznom pomaku dužina svakog puta također bude ista (**Slika 2.2 a**). Za lokaciju objekta T ukupni povratni fazni pomak ostaje isti za svaki element, a električno polje svakog pojedinog elementa pridodaje se fazi. Prilikom pomaka na drugi fokusirani objekt, udaljenost od objekta i sumarne točke je drugačija pa se niz elemenata razlikuje u fazi. Ukoliko se objekt nalazi van žarišne točke vrijednost sume izlaza će biti manja (Ulaby i Long 2014.).

SAR-u je svaki element zauzet u različito vrijeme dok se kreće za razliku od RAR-a. Kada je element aktivan bilježi se amplituda i faza primljenog signala, a kada se sa svih elemenata prikupe snimke one se zbrajaju te se produkt blende sintentizira. Nakon što je radar zauzeo svako mjesto u sintetičkom nizu (**Slika 2.2 b**) sadržaj memorijskih ćelija 1 do 5 se fazno pomiče za pomak koji je potreban za kompenziranje različitih udaljenosti  $R_1$  do  $R_5$ . Odnosno memorijska ćelija 1 ( $V_1$ ) se množi s naponom 1 ( $e^{+j2kR_1}$ ) i tako dalje za ostale elemente. Korekcija faze 1 ( $+2kR_1$ ) označena je na **Slici 2.2 b** kao  $\Phi_{C1}$ . Suma faze svih korigiranih signala je 5 puta veći od vrijednosti jednog signala. SAR nema zahtjeva za kontinuiranim kretanjem od elemenata do elementa niza, jedini je zahtjev da položaj svakog elementa u odnosu na žarišnu točku T bude poznat i da se u procesoru primijene odgovarajuće korekcije faze. Koncept sa **Slike 2.2** korekcije faza je primjenjiv samo kada je propusnost sustava mali dio radne frekvencije (Ulaby i Long 2014.).

Daljinska istraživanja zahtijevaju specijalizirane radar za posebne namjena npr. radare koji za mjerenja brzine i smjera vjetrova na moru koriste raspršivače. Iako su klasificirani kao senzor bez slike, svemirski rasuti mjerači mogu se koristiti za generiranje slika niske rezolucije. Zračni radar s antenom koja snima sa strane (SLR ili SLAR) širokim snopom

okomito, a uskim snopom paralelno putanji kretanja satelita. Slika se stvara kretanjem radara iznad područja koje pokriva kao je i prikazano na **Slici 2.3**. Jednostavnim impulsnim sustavom odnosno kratki impuls se prenosi s radara prema površini, prvenstveno unutar prikazanog vodoravno uskog snopa. Kad val dođe do objekta, signal se reflektira i vraća do antene. Korištenjem SLR sustava (**Slika 2.3**) kod aviona pomoću serija linearnih snimka dobiva se dvodimenzionalna slika snimane površine. U praksi ovaj oblik snimanja ima značajna ograničenja. (Ulaby i Long 2014.)



**Slika 2.3** SLAR tehnika (Ulaby i Long 2014.).

### 2.2.1. Mjerenje SAR tehnikom

Radarski sustav mjeri vrijeme koje je potrebno emitiranom radarskom signalu da dođe do objekta te se reflektira nazad do antene (prijamnika). Prema dobivenom dvosmjernom vremenu putovanja  $t$  i poznatoj brzini EM signala  $c$  (proporcionalno brzini svjetlosti u vakumu,  $c = 299\,782\,458\text{ ms}^{-1}$ ) moguće je odrediti udaljenost  $R$  između antene i snimljenog objekta prema jednadžbi (Hanssen, 2001.):

$$R = \frac{c \times t}{2} \quad (2.2)$$

Mogućnost određivanja udaljenosti više objekata ovisi o propusnosti radarskog impulsa ili o prostornoj rezoluciji slike. Prostornu rezolucija kod radara za daljinska snimanja možemo nazvati radarskim „potpisom“ koji je definiran azimutom (uzduž antene) i smjerom dometa (okomitim na azimut). U radarskom sustavu propusnost je definirana valnom duljinom  $\lambda$ , duljinom antene  $L_a$  i antenskim rasponom  $D_a$  te energetsom konstantom koja iznosi 0,886. Propusnost u dometu se definira prema jednadžbi (**Hanssen, 2001.**):

$$B_r = 0,886 \times \frac{\lambda}{D_a} \quad (2.3)$$

$$B_a = 0,886 \times \frac{\lambda}{L_a} \quad (2.4)$$

Rezolucija azimuta je definirana kao propusnost emitirane zrake ( $B_a$ ) na određenu udaljenost  $R$  prema jednadžbi (Hanssen, 2001.):

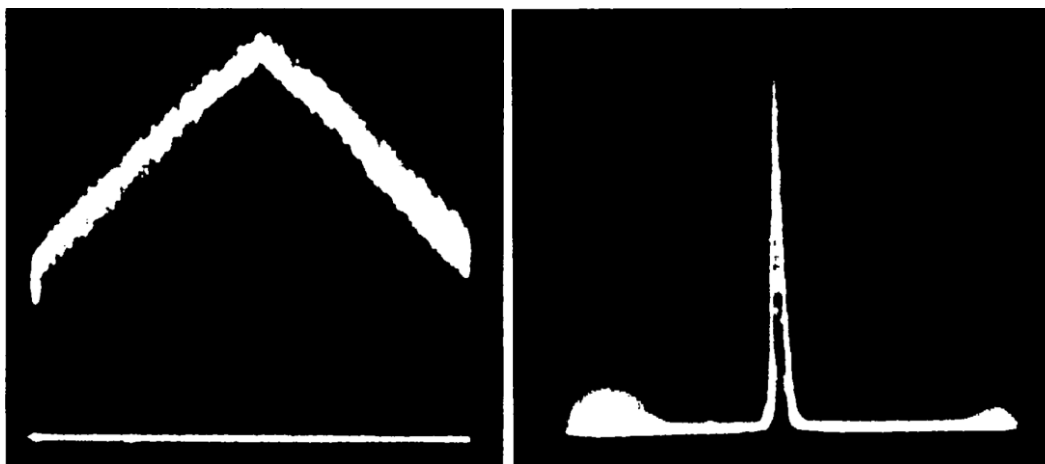
$$\Delta_a = B_a \times R \quad (2.5)$$

Prema prikazanoj jednadžbi 2.5 rezolucija azimuta obrnuto proporcionalna duljini same antene. Iz toga proizlazi da će se povećanjem duljine antene smanjivati radarska propusnost čime se i umanjuje visina rezolucije. Raspon rezolucije je definiran kao najkraća udaljenost pri kojoj dva različito raspršena objekata sa istim intenzitetom povratnog raspršenja mogu biti razaznati kao zasebni signali (Born and Wolf 1959.). Prema Hanssenu (2001.) u radarskom sustavu rezolucija je određena valnom duljinom i može se izraziti prema jednadžbi:

$$\Delta_r = \frac{c \times \tau}{2} \quad (2.6)$$

Kraće trajanje emitiranog pulsa rezultirat će većom rezolucijom, ali sam uređaj ima ograničenu količinu energije na raspolaganu u nekom vremenu. Pa zbog toga postoji ograničenje za minimalne korisne duljine samog pulsa. Poželjno je ostvariti puls velike snage kako bi se mogao dobiti (primiti) impuls sa visokim omjerom signala i šuma čime se postiže potrebna pouzdanost detekcije reflektiranog signala. Rješenje ovog problema je pronađeno u tehnici komprimiranja koju su osmislili Strickland i Mouro (1895.). Signal se najprije oblikuje u oblik „cvrkuta“ sa linearno modeliranom frekvencijom (**Slika 2.4 a**)). Cvrkut je signal u kojem se frekvencija s vremenom povećava (uzdiže) ili smanjuje. Ova frekvencija omogućuje prijenos pulsa dugog vremena trajanja, a male količine energije. Emitira se rastegnuti puls kako bi pojačalo radilo smanjenom (optimalnom) snagom u duljem vremenskom periodu. Nakon prikupljanja puls se detektorom obrađuje sa uređajem

za filtraciju signala kako bi se dobio puls visoke energije (**Slika 2.4 b**) (Strickland i Mourou, 1985.).



**Slika 2.4** Cvrkut (Strickland i Mourou, 1985.).

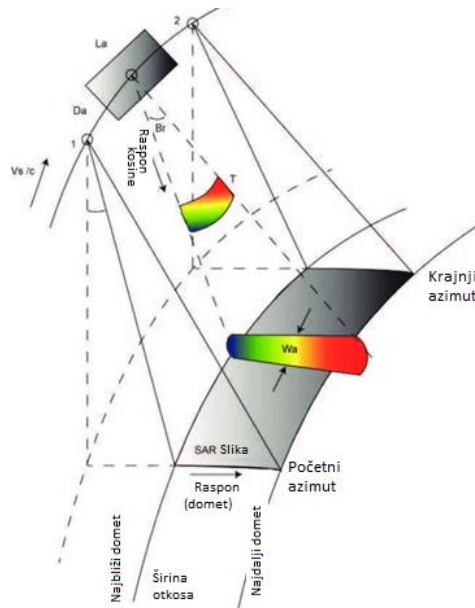
Poboljšanje efektivnog rezolucijskog raspona može se postići te izraziti jednadžbom (Hanssen, 2001.):

$$\Delta_r = \frac{c}{2B_r} \quad (2.6)$$

Prema jednadžbi 2.6  $B_r$  je opseg propusnosti zrake frekvencije cvrkuta. Princip ostvarivanja rezolucijskog opsega danas se koristi u svim radarskim sustavima, ali kod SAR-a postoji razlika. SAR sustav koristi poboljšanu rezolucijsku azimutnu tehniku.

### 2.2.2. Način snimanja SAR-om

SAR je koherentan aktivni radarski sustav koji provodi snimanje sa pokretne satelitske letjelice pomoću antene koja je postavljena u smjeru putanje leta. Pomoću antene emitira ravan snop zraka sa strane i prema dolje prema Zemljinoj površini. Svaki emitirani snop zraka zrači dio Zemljine površine sa svojim „potpisom“ koji je definiran širinom snopa u smjeru azimuta i dosegom zraka. Najčešće upotrebljavani akvizicijski model kod SAR-a je SM (stripmapping). Prema ESA, SM način rada koristi se samo za male otoke i na zahtjev za izvanredne događaje poput upravljanja u hitnim slučajevima. SM model (**Slika 2.5**) slika kontinuirano „osvjetljava“ Zemljinu površinu uzduž putanje sa uzastopnim snopom, time se kreira trakasta (Morier i dr., 2013.).



**Slika 2.5** Trakasta slika, SM model (Morier i dr. 2013.).

Interferometrijska širina IW (eng. Interferometric Wide) je glavna metoda otklona za kopnena snimanja koja zadovoljava i mnoštvo različitih zahtjeva. Metoda prikuplja podatke s otklonom snimke od 250 km, prostorne razlučivosti od 5 x 20 m. IW način rada snima tri područja u sub-swath-u koristeći TOPSAR (eng. Terrain Observation with Progressive Scans SAR) tehniku. TOPSAR tehnikom snima se snopom zraka koji je elektronički usmjeravan za svaki rafal od naprijed prema nazad u smjeru azimuta, čime se izbjegava „crtkanost“ slike odnosno osigurava se homogena slika u cijelom otkosu (Morier i dr. 2013.).

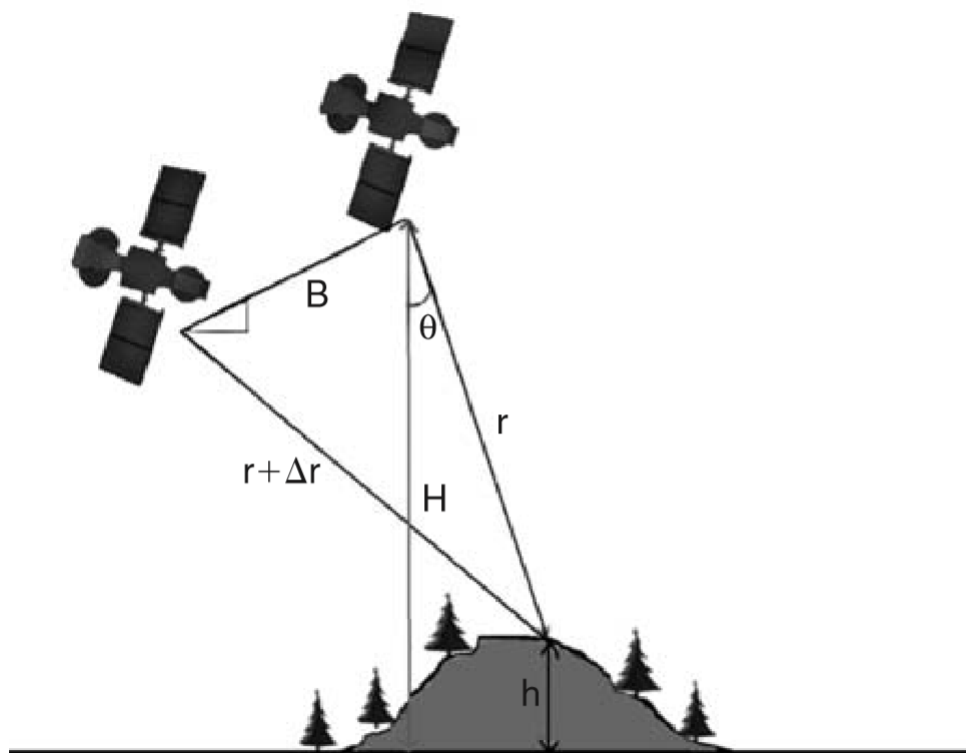
### 2.2.3. TOPSAR

Terensko istraživanje sa progresivnim SAR snimanjem ili skraćeno TOPSAR je vrsta ScanSAR metode kod koje se podaci prikupljanjem u cikličkim nizovima prebacuju sa emitiranja snopa zraka na kreiranje sub-swatova. Akvizicije TOPSAR-a omogućuje veliki raspon otkosa i poboljšane RM performanse kojima se postiže smanjenje utjecaja šuma. TOPSAR metode omogućuje upravljanje rasponom snopova i ScanSAR također omogućuje elektroničko usmjeravanje snopa naprijed-nazad u smjeru azimuta za svaki rafal. Čime se izbjegava pojava šumova, a kao rezultat se dobiva homogena slika visoke kvalitete duž cijelog otkosa. Kod ove metode azimutna rezolucija je smanjena u odnosu na SM metodu zbog kraćeg vremena osvjetljenja rafalom. Prilikom korištenja opsežnog azimutnog uzorka svaki se ciljani objekt vidi na istom antenskom uzorku neovisno o svome azimutnom položaju na rafalnoj slici. Smanjivanjem azimuta antenskog uzorka dolazi i do smanjenja šuma u uzorku. Rafali su sinkronizirani tokom svakog ponovnog prijelaza preko istovjetnog

objekta kako bi se osiguralo preklapanje interferometrijskih parova. Kako bi bile korisne za generiranje interferograma, TOPSAR rafali se sinkroniziraju između ponavljanih podatkovnih uzoraka, a za to je potrebno ostvariti sinkronizaciju rafala na vrijednost manju od 5 ms. SENTINEL-1 TOPSAR metoda se koristi prilikom interferometrijske obrade širokim otkosom (IW) i ekstra širokim otkosom (EW) (De Zan i Guarnieri, 2006.).

### 2.3. InSAR

SAR koji istovremeno koriste više antena određene geometrije nazivaju se interferometrijski SAR ili skraćeno InSAR (Ulaby i Long 2014.). Mjerenje kutova dugo je ostala nedostižna koristeći konvencionalne geodetske tehnike jer je ne moguće da radar ili SAR razlikuju dva objekta u istom rasponu, ali u različitim kutovima prema instrumentu, pa se to na postiglo koristeći dva senzora. Korištenjem dvije SAR slike, snimljene pomoću dvije različite antene ili ponovljenim akvizicijama omogućilo je mjerenje udaljenosti kao i kutna mjerenja (**slika 2.6**). Korištenje faznih mjerenja (multiplikativna interferometrija) omogućilo je promatranje relativnih udaljenosti kao udio valne duljine radara s razlikama u pozicijama senzora (Hanssen, 2002.).



Slika 2.6 InSAR princip mjerenja (Düzgün i Demirel, 2011.).

Elevacija se može izračunati prema sljedećoj jednadžbi:

$$h = H - r \times \cos \theta \quad (2.7)$$

Gdje je:

$H$  - nadmorska visina satelita

$r$  - udaljenost od satelita do ciljnog područja

Potrebni parametri, nadmorska visina satelita ( $H$ ) i udaljenost od satelita do ciljnog područja ( $r$ ) mogu se odrediti na temelju satelitske orbite i podataka o položaju. Iz **slike 2.6** vidi se da visinu objekta ( $h$ ) možemo izračunati pomoću kuta  $\theta$ . Prema tome može se reći da se InSAR oslanja na visinske podatke čime se izračunava kut  $\theta$  na temelju fazne razlike dviju SAR slika. Pa je jasno da točnost visinskih podataka ( $h$ ) ovisi o točnosti visine satelita ( $H$ ) i udaljenosti između satelita ( $B$ ) i objekta koji se snima. Pa se može zaključiti kako je za InSAR obradu ključna točnost podataka o orbiti i položaju (Düzgün i Demirel, 2011.).

Prema Wrightu i Stowu (1999.) razlika faza dvije složene SAR slike u istom području funkcija je topografije i pomaka tla. Prema tome InSAR može koristiti za mjerenje i praćenje deformacija Zemljine površine uzrokovanih potresima, vulkanima te vađenjem i podzemnih voda i fosilnih goriva te sljeganjima uzrokovanih izgradnjom podzemnih objekata npr. rudnika. InSAR omogućuje mjerenje sljeganja na regionalnoj ljestvici a točnost mjerenja visine s može biti i do nekoliko centimetara. Prednost InSAR-a je i u pružanju podataka za poboljšanje točnosti modela sljeganja zbog znatno povećane količine dostupnih povratnih podataka. Radarski odjek sadrži podatke o amplitudi i o fazi. Većina radarskih aplikacija za snimanje slika koristi algoritme koji koriste samo amplitudu za izvlačenje geofizičkih i biofizičkih informacija o snimljenoj sceni. Kod InSAR-a treba iskoristiti faznu razliku između dva radarska odjeka, povezana s istim pikselom slike, ali mjerena s dva različita sustava u različitim smjerovima za dobivanje korisnih geofizičkih informacija. Mjerenje takve fazne razlike poznato je tehnika u optici kao interferometrija. Mnoge iste pristupe koji se koriste u optičkoj interferometriji možemo primijeniti za modeliranje i analizu radarskih signala. InSAR također se koristi za mjerenje gibanja površine. Većina aplikacija InSAR oslanja na dostupnost slika terena visoke rezolucije pa se interferometrijski podaci prikupljaju i obrađuju pomoću SAR tehnika pa od tud i potječe naziv interferometrijski SAR ili skraćeno InSAR ili IFSAR (Ulaby i Long 2014.).

## 2.4. Sentinel-1

Misija Sentinel-1 je Europski radarski opservatorij za zajedničku inicijativu Europske komisije (EC) i Europske svemirske agencije (ESA) Copernicus. Copernicus je europska inicijativa za provedbu informacijskih usluga koje se bave okolišem i sigurnošću. Temelji se na podacima promatranja primljenim sa satelita Promatranja Zemlje i zemaljskim informacijama. Misija Sentinel-1 uključuje snimanje u C-pojasu koje radi u četiri ekskluzivna načina snimanja s različitom rezolucijom (do 5 m) i pokrivenošću (do 400 km). Za svako promatranje dostupna su precizna mjerenja položaja snimke i položaja svemirskih letjelica. SAR radar ima prednost rada na valnim duljinama koje nisu ometene naoblakom ili nedostatkom osvjetljenja te može prikupljati podatke preko web lokacija danju ili noću u svim vremenskim uvjetima. Sentinel-1 sa svojim C-SAR instrumentom pruža pouzdan nadzor na velikom području. Sama misija se sastoji od dva satelita Sentinel-1A i Sentinel-1B koji dijele istu orbitalnu ravninu. Sentinel-1 dizajniran je za rad u unaprijed programiranom načinu rada bez kolizije, prikazuje sve globalne kopnene mase, obalne zone i pomorske rute u visokoj razlučivosti. Osigurava pouzdanost koju zahtijevaju operativne službe i dugoročnu arhivu podataka izgrađenu za aplikacije na temelju dugih vremenskih nizova. C-SAR uređaj je dizajniran i razvijen od strane EADS Astrium GmbH, Njemačka. Uređaj osigurava snimanje u svim vremenskim prilikama, danju i noći. Ima sposobnost prikupljanja podataka mjerenja u visokoj i srednjoj rezoluciji nad kopnom, obalnim područjem i u području ledenjaka (De Zan i Guarnieri, 2006.).

C-SAR je uređaj koji u aktivnoj fazi antenskog niza osigurava brzo skeniranje po visinskim razlikama ( za pokrivanje velikog raspona upadnog kuta i za podršku ScanSAR misiji) i po azimutu (da bi se omogućilo TOPS tehnika za ispunjavanje potrebnih performansi slike). Da bi se zadovoljili zahtjevi polarizacije uređaj sadrži dvokanalne antene za prijenos i prijam H/V-polariziranih parova. Uređaj ima unutarnju shemu kalibracije gdje se prijenosni signali usmjeravaju u prijamnik kako bi se omogućilo praćenje amplitude/faze i osigurala visoka radiometrijska stabilnost. Sentinel-1 ima metalizirano plastično kućište ojačano karbonskim vlaknima kako bi se osigurala dobra radiometrijska stabilnost iako sami elementi nisu obuhvaćeni unutarnjom shemom kalibracije. Digitalni generator cvrkuta i selektivan filter mrežne propusnosti omogućuju učinkovito korištenje ugrađene memorije uzimajući u obzir ovisnost rezolucije o rasponu slike kod upadnog kuta (De Zan i Guarnieri, 2006.).



## 2.5. Sentinel-1 proizvodi

Sentinel-1 pruža mogućnost unosa podataka za aplikacije u prioritetnim područjima Copernic-a kao što su pomorskog nadzora, nadgledanja zemljišta i upravljanja u hitnim slučajevima (De Zan i Guarnieri, 2006.).

Sentinel-1 radi u četiri načina rada (De Zan i Guarnieri, 2006.):

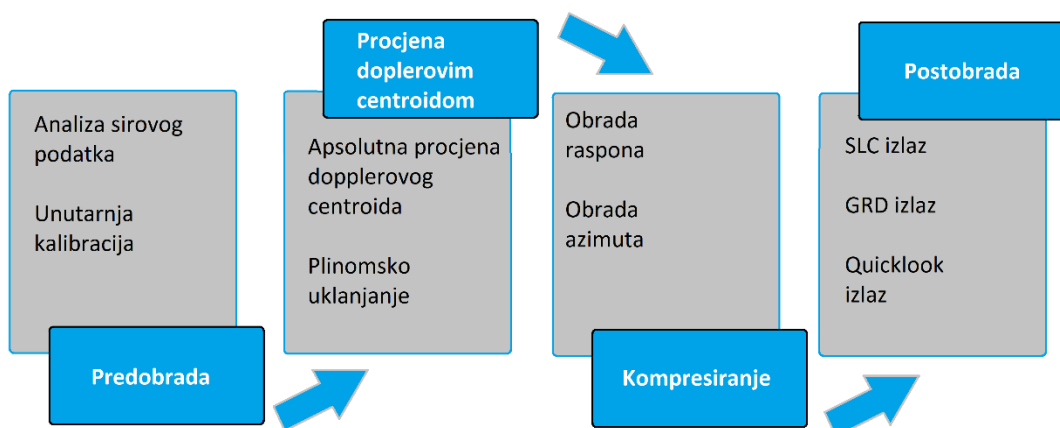
- Stripmap (SM),
- Interferometric Wide swath (IW),
- Extra-Wide swath (EW),
- Wave (WV).

SAR instrumenti C-band podržavaju rad u jednoj polarizaciji (HH ili VV) i dvostrukoj polarizaciji (HH+HV ili VV+VH). EW način rada prvenstveno se koristi za nadzor velikog obalnog području, uključujući promet brodova, izljeve nafte i praćenje ledenjaka. SM način rada koristi se samo za male otoke i na zahtjev za izvanredne događaje poput upravljanja u hitnim slučajevima. IW načina rada kao glavni način rada zadovoljava većinu zahtjeva, izbjegava kolizije i održava performansu ponovljene obrade, pojednostavljuje planiranje misije, smanjuje operativne troškove i stvara dosljednu dugoročnu arhivu podataka. Svakim načinom rada moguće je dobiti proizvod na Level-0 RAW, Level-1 SLC, Level-1 GRD i Level-2 OCN. Podatkovni proizvodi Sentinel-1 prikupljeni u SM, IW i EW načinu rada generiraju se pomoću Segmenta podataka korisnog opterećenja (PDGS) koji ih distribuiraju na tri razine obrade (De Zan i Guarnieri, 2006.):

- Level-0,
- Level-1,
- Level-2.

Proizvodi obrade Levela-1 razine mogu biti Single Look Complex (SLC) ili Ground Range Detected (GRD) proizvod. Za razliku od razine Level-2 Ocean (OSN) proizvoda koji može koristiti različite komponente koje su mu na raspolaganju prilikom obrade. Svi proizvodi se obrađuju direktno sa Level-0 razine (Prema **Slici 2.7**) te se može svaki način rada generirati (SLC, GRD i OSN) (De Zan i Guarnieri, 2006.). SAR proizvodi na Level-0 sastoje se od komprimiranih i nefokusiranih sirovih podataka (RAW). Proizvodi Level-0 osnova su na kojoj se proizvode svi drugi proizvodi visoke kvalitete. Podaci Level-0 komprimiraju se pomoću fleksibilne dinamičke blok adaptivne kvantizacije (FDBAQ) koja omogućuje kodiranje promjenjive brzine prijenosa koja povećava broj bitova. Da bi podaci bili

upotrebljivi oni se dekomprimiraju i obrađuju pomoću softvera za fokusiranje. Podaci Level-0 sadrže šumove, interne pakete o kalibraciji i izvorima eke kao i podatke o orbiti i visinskim informacijama. Proizvodi Level-0 pohranjuju se u dugoročnoj arhivi. Mogu se obraditi za stvaranje bilo koje vrste proizvoda tijekom trajanja misije i 25 godina nakon završetka operacija, a dostupni su samo za SM, IW i EW načine rada (De Zan i Guarnieri, 2006.).



**Slika 2.7** Level-1 Tok obrade prema De Zan i Guarnieri, 2006.

Proizvodi Levela-1 namijenjeni su za najčešću obradu tj. primjenu. Proizvodi Levela-0 (RAW proizvodi) pretvaraju se u proizvode Level-1 korištenjem Instrumenta za obradu IPF pomoću dalje navedenih algoritama. Proizvodi Level-1 čine osnovni proizvod za daljnju pretvorbu u proizvod Level-2. Postupci koji uključuju proizvodnju Level-1 proizvoda sadrže sljedeće korake. Pred obradu, procjenu Doppler centroida, SLC i sliku sa naknadnom obradom za generiranje SLC i GRD proizvoda te posebnu višestruku pod pojasu obradu. Podaci Level-1 mogu se obraditi u proizvode Single Look Complex (SLC) i/ili Ground Range Detected (GRD). SLC proizvodi čuvaju fazne podatke i obrađuju se na prirodnom razmaku piksela, dok GRD proizvodi sadrže otkrivenu amplitudu i imaju višestruki izgled kako bi se smanjio utjecaj „pjegavosti“ (De Zan i Guarnieri, 2006.).

### 3. KORIŠTENI SUSTAV

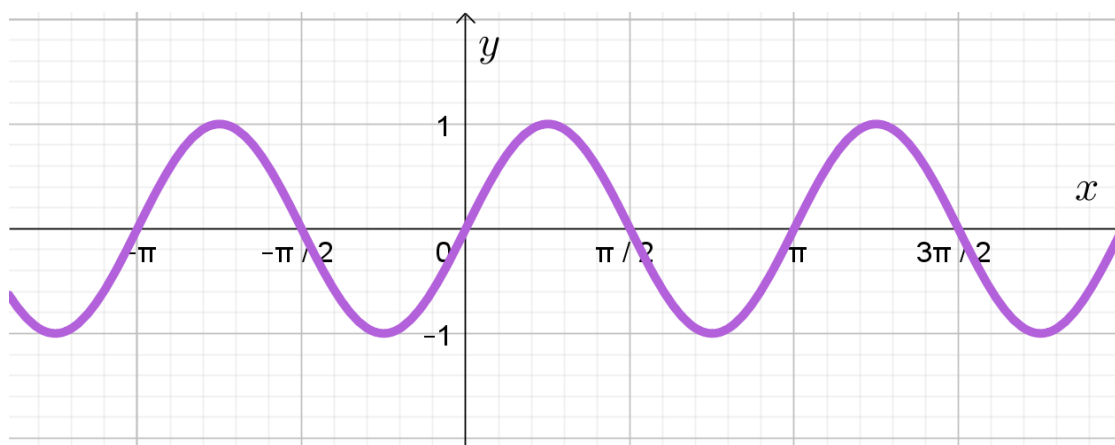
#### 3.1. SLC - Single look complex

Produkti Level-1 Single Look Complex (SLC) sastoje se od fokusiranih SAR podataka, geografski referenciranih pomoću orbitalnih podataka i položaja satelita, a prikazanih u geometriji kosog raspona. Kosi raspon je prirodna način promatranja radarskog dometa, definirana kao linija vidljivosti od radara do svakog objekta, reflektora. Proizvodi su u 0-Doppler orijentaciji gdje svaki red piksela predstavlja točke duž linije okomite na pod satelitski trag. Proizvodi uključuju SL (Single Look) u svakoj dimenziji koristeći cijeli propušteni signal i složene uzorke (stvarne i imaginarne) koji sačinjavaju fazne podatke. Proizvodi su georeferencirani pomoću podataka o orbiti i položaju sa satelita te su korigirani za azimutno bistatičko kašnjenje, uzorak antene i gubitak raspona. SM SLC-i sadrže jednu sliku po polarizaciji za pojedinačni raspon. IW ima tri pod-sloja odnosno ima tri slike u jednoj polarizaciji te šest slika s dvostrukom polarizacijom. EW ima pet pod-otvora, ima pet slika za jednu polarizaciju i deset slika za proizvode s dvostrukom polarizacijom. IW i EW svaki pod-sloj se sastoji od niza rafala po azimutu (De Zan i Guarnieri, 2006.).

Pojedinačno usredotočeni složeni podaci uključeni su u nizu, prema azimutnom vremenskom rasporedu u jedan pod-dio slike, s razgraničenjem ispunom crnom bojom. Za IW, fokusirani rafal traje ~ 2,75 sekundi a preklapanje rafala od približno ~ 0,4 sekunde. Za EW, fokusirani rafal traje ~ 3.19 sekundi s preklapanjem od ~ 0.1 sekunde. Preklapanje se blago povećava u rasponu unutar podnožja. Ovo preklapanje dovoljno je da osigura neprekidnu pokrivenost tla. Slike za sve rafale u svim pod-slojevima IW/EW SLC proizvoda ponovno se uzorkuju na zajedničku mrežu razmaka piksela u rasponu i azimutu. Burst sinkronizacija održava se za IW i EW proizvode kako bi se osiguralo da se može izvesti interferometrija između parova proizvoda koji su stekli više razdoblja ponavljanja. Zapis skupova podataka Swath Timing u SLC proizvodima sadrži informacije o nizovima, uključujući dimenzije, vrijeme i mjesto koje se mogu koristiti za spajanje rafala i otkosa zajedno. Zapis skupova podataka Swath Timing u SLC proizvodima sadrži informacije o nizovima, uključujući dimenzije, vrijeme i mjesto koje se mogu koristiti za spajanje rafala i otkosa zajedno (De Zan i Guarnieri, 2006.).

### 3.2. Karakterizacija SAR slike

SLC slika može se iskazati kao matrica definirana brojem „rezolucijskih ćelija“ odnosno piksela u radarskom koordinatnom sustavu. Granice slike su određene ranim i kasnim azimutnim vrijednostima te vrijednostima bliskog i dalekog raspona koje upućuju na početni i krajnji primljeni radarski signal uzduž i okomito na putanju kretanja. Veličina rezolucijske ćelije je određena SAR azimutom i rezolucijskim dometom emitiranog na Zemlju. Svaki pojedini piksel je povezan sa pojedinim manjim područjem na Zemljinoj površini i sadrži kompleksni broj koji je nosilac informacije povratnog, raspršenog radarskog signala. Radarski signal se može opisati kao sinusoidni val **slika 3.1** kojemu je amplituda definirana kao najveća apsolutna vrijednost od valnog perioda i faze kao dio perioda. Udaljenost između dva susjedna brijega ili dola nazivamo valnom duljinom ( $\lambda$ ). Valna duljina radijskog signala određuje stupanj propusnosti kroz atmosferu (Hanssen, 2001.).



Slika 3.1 Sinusoida (Esutorij 2021.).

Često se koristi mikrovalna valna duljina raspona od 3 do 30 cm kako bi se izbjegla absorpcija signala vodenom parom i kisikom te raspršivanje uzrokovano ionosferom. Stoga na SAR sustave meteorološke promjene kao što su oblaci i padaline nemaju značajan utjecaj. Karakterizacija povratnih signalnih raspršenja kao što su amplituda, faza i polarizacija zavise o nagibu, grubosti i dielektričnim svojstvima snimanog područja. Amplituda je mjera jakosti primljenog signala te odraz refleksije od površina različitih svojstava. Amplitude velikih razmjera pojavljuju kod snimanja urbaniziranih područja, dok malih razmjera i niske povratne energije u područjima s vegetacijom i vodenim površinama (rijeke, jezera, mora i dr.). Faza signala je povezna s udaljenošću, pa se može reći da sadrži najvrijednije informacije za radarsku interferometriju. Faza ( $\varphi$ ) se može proračunati pomoću putovanja

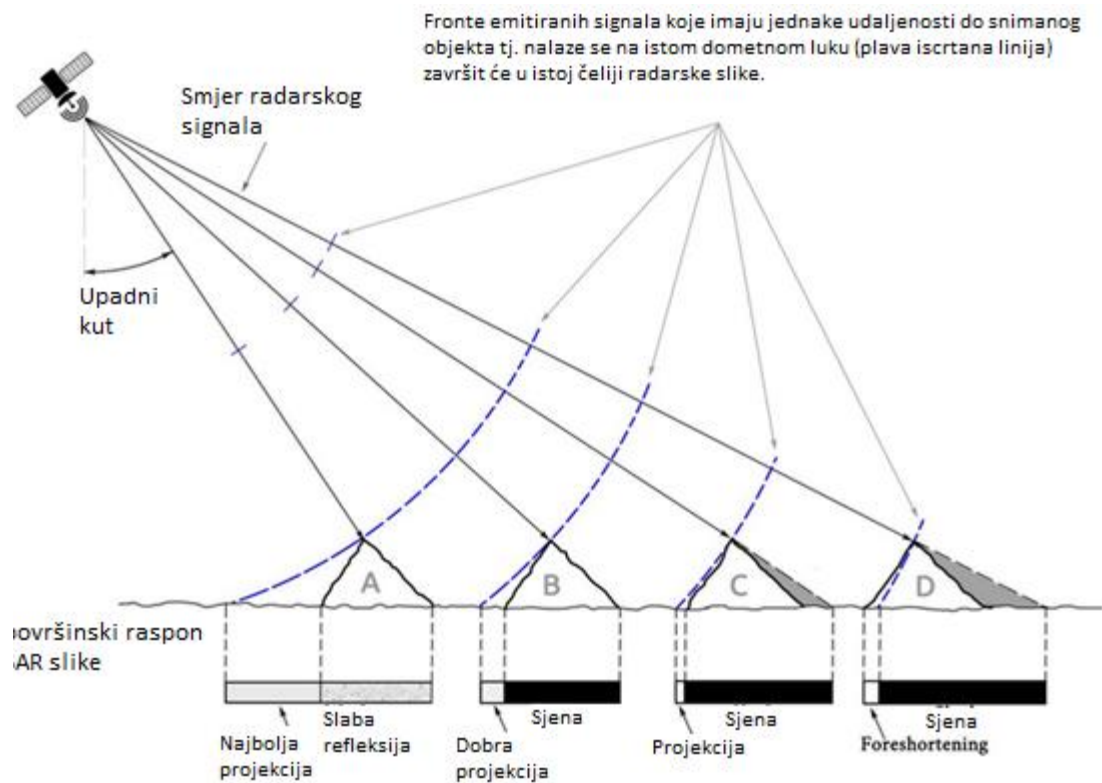
signala do raspršivača (objekta) na udaljenosti  $R$  i nazad prema jednadžbi 3.1. (Hanssen, 2001.):

$$\varphi = \frac{2\pi \times 2R}{\lambda} = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (3.1)$$

Promjena udaljenosti uočava se kao vremenska razlika emitiranog i povratnog signala te se prikazuje kao različita fazna vrijednost. Iz toga možemo reći da će se svaka promjena udaljenosti odraziti na fazne vrijednosti raspršivača. Promjenu udaljenosti moguće je uočiti samo ako je manja od valne duljine signala. S obzirom na periodičnu prirodu elektromagnetskih signala (EM) samo manji sekvenca periode se primi, a promjene u udaljenostima su veće nego kod cijelog perioda (Hanssen, 2001.).

### 3.3. Ograničenja snimanja

S obzirom da radarski signal širi prema dolje pod određenim kutom njega duljina putovanja se mijenja od bližeg prema daljem raspršivaču (objektu). Isto kako i kod različitih duljina putovanja, prvi i posljednja primljena jeka određuju se pomoću zakašnjenja njihovog prijama. Na ovaj način SAR s lakoćom razlikuje raspršivače u smjeru dometa. Geometrija snimanja sa strane ima neke nuspojave koji su proporcionalni područnim nagibima terena koji stvara geometrijska izobličenja kod SAR slika. Ukoliko je nagib terena gotovo okomit na smjer širenja signala dolazi do povećanja područje osvijetljenosti (Zemaljski rezolucijski piksel) jednim radarskim valnim periodom. Taj efekt naziva se **Foreshortening** i prikazan je na **slici 3.3** (Hanssen, 2001.).

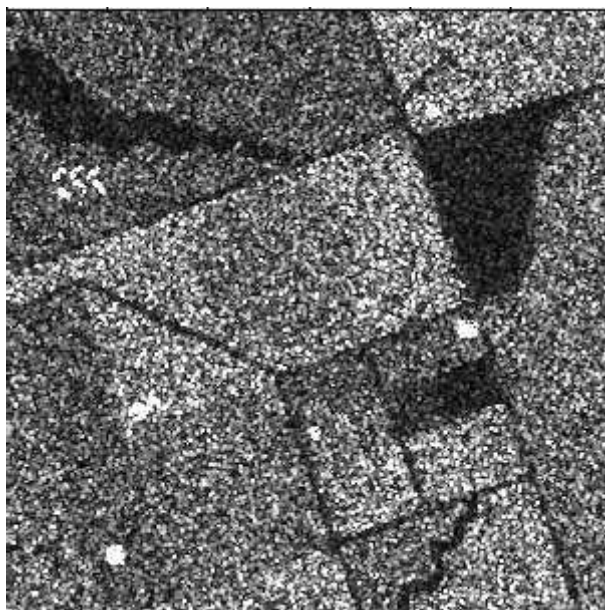


**Slika 3.2** Geometrijski poremećaji SAR slike uzrokovani oblikom i rasporedom terena (Researchgate 2021.).

Rezultat projekcije je kompresija više raspršenja slike u jedan rezolucijski piksel koji sadrži snažan amplitudni odaziv od višestrukih raspršenja. Područje na Zemljinoj površini koje je osvijetljeno generiranjem SAR slike prikazuje se kao svijetlo i malo područje s obzirom da je to područje obuhvaćeno s malim brojem piksela koji imaju snažni amplitudni odaziv od višestrukih raspršenja. Ukoliko možemo okarakterizirati osvijetljeno područje terena kao teren sa strmim nagibima, pojavit će se efekt preklapanja slojeva. Kako je duljina putovanja do objekata viših nadmorskih visina kraće od onih koji su niže pozicionirani, povratni signal biti će reversno prikupljen. Ukoliko dolazi do naglog smanjenja nagiba terena obuhvaćeno područje neće biti osvijetljeno radarskim signalom. Pojava sjena kod SAR akvizicija događa se u slučaju da nagib kosine ispod, odnosno van vidnog područja radara. To područje u sjeni na SAR slici manifestira se kao crno područje s obzirom da nema povratnog signala za to područje (**Slika 3.3**) (Hanssen, 2001.).

Višestruki šumovi kao što je efekt snijega (eng. spackle effect) je još jedan od ograničavajućih faktora SAR akvizicije. Efekt snijega (**slika 3.4**) je posljedica superpozicije reflektiranih signala višestrukih raspršivača unutar rezolucijske ćelije. Koherentna suma amplituda i faza raspršivača rezultira velikom fluktuacijom povratnih signala od jedne do

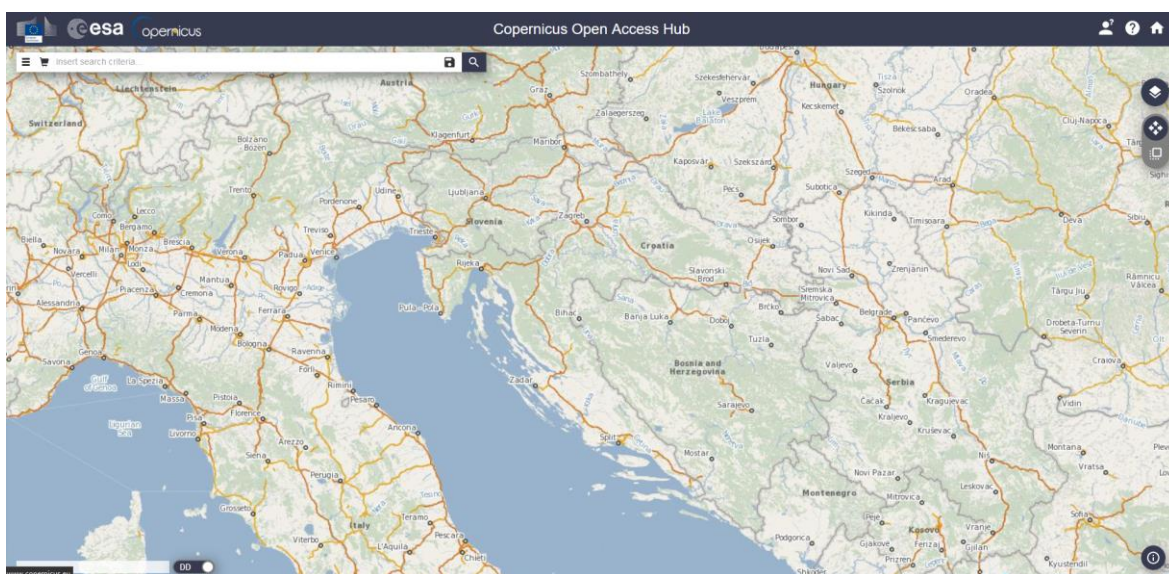
druge rezolucijske ćelije. Rezultirajući eksponencijalnom i uniformnom distribucijom faznog toka i intenziteta. Efekt snijega narušava odnosno degradira radiometrijsku kvalitetu i mogućnost interpretacije SAR slike. Iz tog razloga efekt je potrebno smanjiti nekoherentnim svođenjem rezolucijskih ćelija na srednje vrijednosti. Ta tehnika se naziva **Multilook** obrada, a rezultira poboljšanom radiometrijskom kvalitetom, ali uzrokuje smanjenje prostorne rezolucije (Hanssen, 2001.).



**Slika 3.3** Efekt snijega (eng. spackle effect) (Researchgate 2021.).

#### 4. PODACI I OBRADA PODATAKA

Pred radnja svake obrade podatke je pronalazak i preuzimanje proizvoda istražnog prostora i vremena prikupljanja sa Copernicus Open Access Hub-a (**Slika4.1**). On omogućuje sinkroni pristup posljednjim prikupljenim podacima i asinkroni pristup „povijesnim“ (arhiviranim) podacima. Pristup svim podacima je preko http-a (Hypertext Transfer Protocol) u svim slučajevima, odnosno servera. Podaci postaju povijesni, odnosno arhiviraju se nakon što prođe vremenskog perioda od mjesec dana kad se podaci arhiviraju te im je status pristupa označeni sa "offline". Kod ovog tipa podataka potrebno je zatražiti „restored“ (obnovu) za koji je potrebno oko sat vremena, nakon toga dobiveni podaci ostaju na raspolaganju za preuzimanje najmanje 3 dana (Copernicus, 2021.).



**Slika 4.1** Radno sučelje Copernicus Open Access Hub-a, prikaz RH.

Obrada podataka provedena je pomoću softverskog programa SNAP (**Sentinel Application Platform**) koji se koristi za obradu satelitskih snimaka. SNAP arhitektura je napravljena isključivo za obradu i analizu prikupljenih podatke Zemljine površine (ESA, 2021.) Područje obuhvaćeno istraživanjem je Zagreb, 22.3.2020. područje je pogođeno umjerenim potresom jačine  $ML = 5,5$  (Markušić i dr.). Kako bi se odredili pomaci tla na tom području koriste se podaci najkraćeg vremenskog interval u koji ulazi i dan potresa. Prema tome podaci korišteni u ovoj obradi su snimke Sentinel-1A satelita prikupljanja 17.3.2020. i Sentinel-1B 23.3.2020.

Za bržu obradu podataka u SNAP-u prije svake etape obrade izrađuje se dijagram toka (**Slika 4.2**) u kojem pravokutnici s imenom označavaju korištene operater, a strelicama njihov slijed

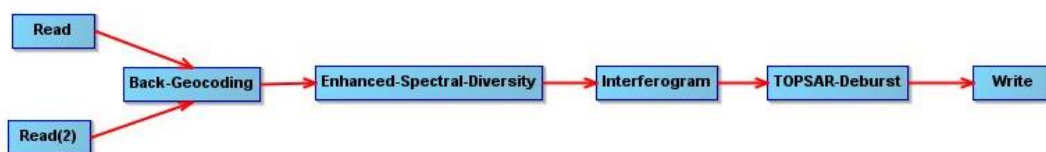


u obrađivanom procesu. Izrada dijagrama toka provodi se pomoću softverskog alat Graph Buildera. Obradu podataka je moguće provesti i korištenjem pojedinačnih operatera, ali to značajno usporava proces same obrade. Proces obrade uvijek započinje se sa Read operaterom koji očitava obrađivani proizvod, a završetak procesa obrade najčešće sa Write operaterom kako bi se željena obrada sačuvala u odabranom zapisu i pod željenim nazivom.



Slika 4.2 SNAP-u dijagram toka: Pred obrada.

U koraku pred obrade izdvajaju se samo podaci koji su potrebni za daljnju analizu. Za obradu TOPSAR-Split operaterom potrebno je odabrati procesne parametre, subswath (IW1, IW2 i IW3) koji je za Zagreba WI2 te također treba odabrati broj burst-eva koji to područje pokrivaju. Za ispitivano područje odabran je raspon bursteva od 1 do 4, te za ovaj tip obrade VV polarizacija. Za obradu dva proizvoda (skupa podataka) provodi se pojedinačna obrada prema prethodno definiranom dijagramu toka. Moguće je napraviti automatizaciju postupka obrade. Alat koji se u tome slučaju koristi je Batch Processing koji provodi automatiziranu obradu pojedinačnih proizvoda prethodno definiranim procesnim dijagramu po principu jedan po jedan što olakšava i ubrzava obradu velike količine pojedinačnih proizvoda. Apply Orbit File operater primjenjuje se za dodavanje orbitalnih informacija o položaju satelita koji su prikupljeni SAR snimanjem. Podatke SNAP aplikacija preuzima, a pomoću operatera se pohranjuju u metapodatke. Završetkom obrade izdvojeni su željeni podaci, samo jedan subswath sa odabranim band-ovima za svaki proizvod. Za drugi stupanj obrade izrađen je dijagram toka prema slici 4.3, potrebno je postaviti dva Read operatera uz pomoć kojih se pozivaju produkti prvog koraka obrade (predobrade) istovremeno.



Slika 4.3 Dijagram toka: Drugi stupanj obrade, SNAP-u.

Uvezene podatke Back-Geocoding operater preklapa pomoću podataka koji su prethodnim postupkom pohranjeni u metapodatke. Odnosno pomoću podatka o položaju satelita u orbiti i pomoću DEM (digital elevation model) podataka koji ovise o području na kojem se provodi istraživanje. DEM podatak skida i unosi sama SNAP aplikacija. Za ovaj tip obrade korištena

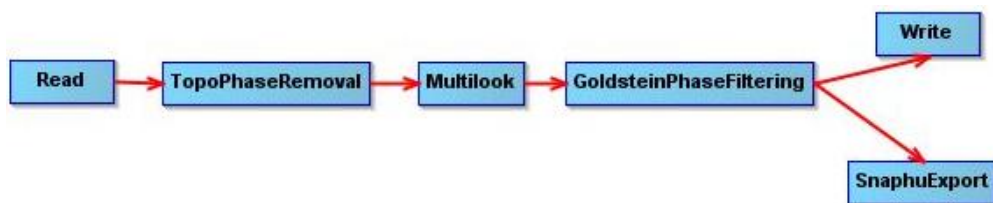
je SRTM set podataka koji ima dobru pokrivenost između 54° sjeverne paralele do 60° južne paralele. Iz tog seta korištena je SRTM 1sec HGT čime se osigurava generiranja najpotpunija slika visoke rezolucije koja se koristi ukoliko se ispituju pomaci Zemljine površine. Ovaj operater omogućio je „maskiranje“ područja bez elevacije kao što su jezera i rijeke koje nalaze na istražnoj lokaciji. Ukoliko se u ispitivanju preklapanje provodi na proizvodima koji sadrže samo jedan burst ovaj operater se ne koristi u obradi. Nadalje se obrada provela na Enhanced-Spectral-Diversity operateru koji obrađuje podatke naprednom metodom spektralnog razlikovanja, operater je potrebno koristiti kao pred obradu za izradu interferograma. Interferogram se izrađuje unakrsnim množenjem referentne slike sa složenom konjugacijom sekundarne slike. Amplituda obje slike se množi, a faza predstavlja faznu razliku između slika. Svaki interferogram sadrži varijacije faze  $\varphi$  uzrokovane šumovima kao posljedica raznih faktora. Najutjecajniji i najbitiniji faktor je flat-earth phase  $\varphi_{RAV}$  (Zemljina zakrivljenost) zatim topographic phase  $\varphi_{DEM}$  (topografija Zemlje), atmosferski uvjeti  $\varphi_{ATM}$  (vlaga ili temperatura i vlaga), ostali šumovi  $\varphi_{SUM}$  (promjena raspršenja, promjena kuta gledanja i volumen rasipanja) i moguće deformacije tla  $\varphi_{DEF}$  koje se pojavljuju između dva perioda snimanja. Bez šumova Interferometrijska faza svakog piksela SAR slike ovisila bi samo o razlici u duljini putovanja od SAR-a do rezolucijske stanice između dva piksela, ali to nije slučaj kako je i opisano jednadžbom (Rocca i dr. 1997.):

$$\varphi = \varphi_{DEM} + \varphi_{RAV} + \varphi_{DEF} + \varphi_{ATM} + \varphi_{SUM} \quad (3.1)$$

Diferencijalnom SAR interferometrijom procjenjuje se utjecajnost Zemljinih površinskih parametara ( $\varphi_{RAV}$  i  $\varphi_{DEM}$ ) koja je jednak kod oba snimanja. Ti parametri se uklanjaju iz interferograma kako bi se preostale fazne razlike mogle razlikovati od fazne deformacije tla. To je najlakše provesti ako su atmosferski uvjeti  $\varphi_{ATM}$  i ostali šumovi  $\varphi_{SUM}$  čim manji zato što ih je teško modelirati. Stoga se istraživanje najčešće provodi sa snimkama koje su snimljene za vrijeme sušne sezone i preporučljivo je koristiti snimke sa malom okomicom osnovne linije (Rocca i dr. 1997.).

Osim interferometrijske faze, koherencija između primarne i sekundarne slike je procijenjena kao indikator za kvalitetu faznih podataka. Ona pokazuje ukoliko slike imaju visoku podudarnost i jesu li upotrebljive za postupak interferometrije. Smanjena koherentnosti može uzrokovati loše interferometrijske rezultate. Uzrok smanjenju mogu biti okolišni (vegetacija, vodna tijela), geometrijski (pogreške ili netočni metapodaci orbite) i

volumetrijska nepovezanost ( mehanizmi raspršenja volumnih struktura kao što su složena vegetacija ili sušna područja). Sukladno iznesenom može se uvidjeti da interferometrija pomoću ponovljenih snimanja (dvaju različitih datuma) rijetko dovodi do uporabljivosti dobivenog rezultata u slučaju područja obuhvaćenog gustom vegetacijom. To izričito vrijedi za podatke dobivene Sentinel-1 misijom sa C-band-om koji ima valnu duljinu od oko 5,5 cm. Koherencija se proračunava kao poseban band raster i prikazuje kolika je podudarnost na skali od 0 do 1 između pojedinih piksela između primarne i sekundarne slike. Područja izražene koherentnosti prikazuju se svjetlija. Prema tome urbana područja sa zgradama prepoznat ćemo na prikazu kao izrazito svjetla, a područja s gustom vegetacijom kao tamna područja. Prema tome Interferogram operatera se podešava s obzirom na željenu daljnju obradu imajući na umu moguća odstupanja uzrokovana utjecajnim gore navedenim parametrima. Rezultat ove obrade je proizvod koji sadrži interferogram i koherencu te odvojene bands-ove. Ovi produkti obrade i dalje sadrže crne linije koje razdvajaju pojedine bursteve stoga je korišten TOPSAR-Deburst operatera. S obzirom da oba skupa podataka (Sentinel- 1A i B) sadrže iste band-ove nije potrebna unositi dodatne parametre obrade. Produkt obrade je jednaka ulazu samo su svi band-ovi spojeni pomoću svojih nula Doppler vremenu (objekti koji su okomite na putanju kretanja). Ukoliko su područja sa niskom koherencijom dominantna može se dogoditi da daljnja obrada ne bude uspješna. Treći stupanj obrade započinje se izradom novog dijagrama toka (slika 4.4) te očitavanjem podataka prethodne obrade (operator Read).



Slika 4.4 Treći stupanj - SNAP dijagram toka.

Unutar podataka postoji faza vezana za topografiju pa ju je potrebno odvojiti kako bi se mogla provesti daljnja obrada. Odvajanje faze provodimo pomoću TopoPhaseRemoval operatera. Topografsku fazu  $\varphi_{DEM}$  definiramo kao razliku upadnog kuta prema istoj točki s obzirom na različitu geometriju gledanja između primarne i sekundarne slike. Topografska faza predstavlja šum prilikom utvrđivanja deformacija pa ju je potrebno ukloniti. Fazna razlika odgovara topografiji i može se odrediti pomoću visinske višeznačnosti. Visinska višeznačnost definira faznu promjenu topografske visine koja odgovara okomitom osnovnom pravcu. Za TopoPhaseRemoval operatera odabran je isti DEM operativni model

(SRTM 1sec HGT) te opciju Output topographic phase band kako bi se izdvojila topografska faza. Korištenjem operatera Multilooking generiran je proizvod kako bi se dobili pikseli „normalne“ veličine. Kod operatera odabire se pogled od 8 m i azimut od 2 m čime se kreiraju pikseli veličine 28,659851 m<sup>2</sup>. Rezultat ove obrade je slika sa manje šumova i aproksimirana kvadratnim pikselima. GoldsteinPhaseFiltering operaterom filtriramo fazu koja je prethodno odvojena. Interferometrijska faza može biti oštećena šumovima vremenske i geometrijske dekolacije, volumnim rasipanjem i ostalim procesnim greškama.

Fazni podaci u nepovezanim područjima ne mogu se obnoviti, ali kvaliteta postojećih rubova u interferogramu mogu se poboljšati korištenjem ovog filtera koji koristi FastFourierTransmission (FFT) kako bi poboljšao odnos signal-šum na slici (Goldstein i Werner 1998.).

Kod ovog postupka odabrana je željna FFT veličina koja je iznosila 128. Odnosno definiran je broj ćelija koje se koriste za „podjelu“ obuhvatnog prostora na jednake trake i ćelije. Ćelija je u ovom slučaju boja spektra i definira frekvenciju razlučivosti. Kreira se Write operater kako bi se zapis prethodnog postupka spremio, također i SnaphuExport operater za uspješno izdvajanje faze. Ovaj tip obrade rezultira sa dva proizvoda, proizvod (write operatera) unutar SNAP-a ima jedan prikaz više nego prethodni proizvod. Drugi proizvod se ispisuje pomoću SnaphuExport operatera koji nije rezultirao željenim proizvodom. Stoga je ovaj postupak potrebno provesti ručnim izdvojenjem faze. Postupak obrade faze je proveden kroz 3 sljedeća koraka:

1. **Izdvajanje (export)** zamotane faze uz definiranje parametara unutar SNAP-a
2. **Odmatanje (unwrapping)** faze koje se izvodi van SNAP-a pomoću snaphu-a
3. **Umetanje (import)** odmotane faze nazad u SNAP aplikaciju

Izdvajanje faze provedeno je pomoću Snaphu Export operatera. Kod SnaphuExport operatera odabrano je željeno mjesto ispisa, broj stupaca i kolona koji je u ovom slučaju obrade bio jednak 1. Time se uvjetovalo da se prilikom obrade obrađuje jedan po jedan podatak, a nastala proizvod sadrži:

- Koherencu: sliku (\*.img) i metapodatke (\*.hdr)
- Ne odmotanu fazu: sliku (\*.img) i metapodatke (\*.hdr)
- Odmotanu fazu: samo metapodatak (\*.hdr) jer se slika (\*.img) kreira sljedećim korakom

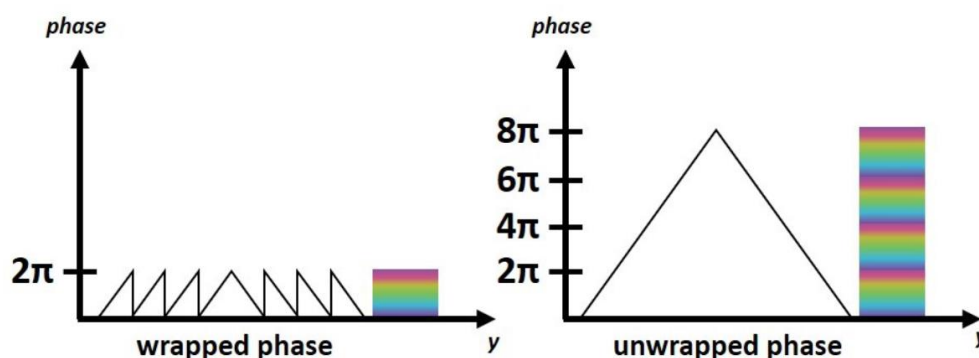
- Konfiguracijsku datoteku (snaphu.conf) koji sadrži parametre definirane izlaznim (Export) operaterom



**Slika 4.5** Operateri četvrtog stupnja obrade SNAP i SNAPHU (KARADIMOU 2020.).

Četvrtim stupnjem obrade (**Slika 4.5**) izdvojenu faza se odmotava pomoću posebnog SNAPHU (statistical-cost network-flow algorithm for phase unwrapping) alata. Time alatom se rasterski prikaz lomi na manje dijelove, 10 stupaca i 10 kolona čime je stvoreno 100 odmotanih „pločica“ koje se spajaju obzirom na preklapanje piksela.

Odmatanje faze je provodano zato što je u interferogramu interferometrijska faza viseznačna i ima raspoznaže do  $2\pi$  odnosno jednog intervala. Interferometrijska faza je izdvojena da bi se odredio odnos s topografijom (visinom), a to je postignuto tako da se najprije faza „odmotala“. Dvoznačna nadmorska visina se definira kao visinska promjena koja generira interferometrijsku faznu promjenu od  $2\pi$  nakon „poravnanja“ interferograma. Operaterom Phase unwrapping riješio se problem s dvoznačnosti. Operaterom se integrirala fazna razlika između susjednih piksela te se obrisalo sve numeričke vrijednosti dvosmislenosti nadmorskih visina. Fazna razlika između dvije točke na „poravnanom“ interferogramu omogućila je određivanje (mjerjenje) stvarnih visinskih promjena (**slika 4.6**). S toga se odmotane proizvode prikazujemo (tumačimo) kao relativne visine/pomake između piksela dvaju slika.



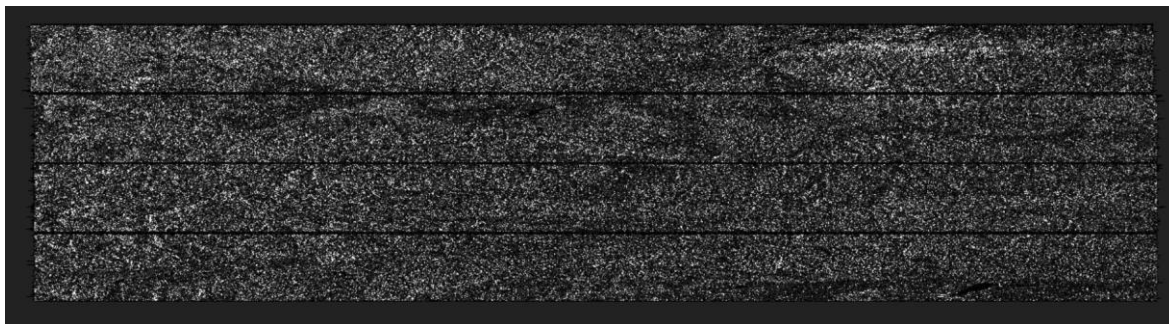
**Slika 4.6** Princip odmatanja faze.

Optimizacija rezultata uz pomoć postupka odmatanja postignuta je u prethodnom koraku (**Slika 4.3**) korištenjem Multi-looking operatera. Operater se primjenjuje najčešće kada je prostorna rezolucije 20 m ili manja. Također može se koristiti kada granice ( $2\pi$  ciklusa) nisu jasno naznačene. Ulazni podatak tj. koherentnost utječe na kvalitetu i pouzdanost produkta

faznog odmotavanja. Prema tome pouzdani podatci se mogu očekivati u području visoke koherentnosti (0,6) iako se ne može definirati donja granica pri kojem podatke ne smatramo pouzdanima u praksi se ne preporučuje uzimanje podataka s izraženom niskom koherentnošću (0,3). Odmotana faza sama po sebi ne sadrži metapodatke niti geokordinate. Stoga su se pomoću SNAPHU aplikacije ti podaci dodali te se dobiveni podataka pretvara BEAM DIMAP format. Ovaj format čitljiv SNAPu softveru koji prepoznaje sadržani zamotani interferogram i odmotanu fazu. Prikaz ovog postupka je raster s ujednačenim prijelazima te malim varijacijama osim u području očekivanih strukturnog pomaka. Sljedeći korak obrade provodio se pomoću Phase to Displacement operatera. Odmotana faza je kontinuirani raster, ali u ovom koraku nije mjerljiva. Stoga je provedeno pretvaranje jedinica iz radijana (relativnih pomaka) u apsolutne pomake pomoću navedenog operatera. On pretvara fazu u površinske LOS (line-of-sight) deformacije izražene u metrima. Svaki piksel ima metričku vrijednost koja označava njegovo pomicanje. LOS je linija između senzora i piksela što znači da će pozitivne vrijednosti prikazuju izdizanja, a negativna slijeganja terena. Pomoću Range Doppler Terrain Correction operater provedena je korekcija produkta (interferograma i pomaka) za koje je korištenja multilooking te za filtrirane podatke. Taj operater dobivene podatke geolocira te ih smješta u geografski koordinatni sustav WGS84. Ujedno ovim operaterom se povećala veličina pojedinog piksela na 100 m čime je smanjena pojava skokova u faznim razlikama već je dobiven zagađeniji prikaz deformacija. Nakon toga je provedeno maskiranje koherencije. Koherencija označava koliko su dobro pikseli primarne i sekundarne slike preklapljeni. Obzirom na veliku količinu piksela niskih vrijednosti koherence bilo ih je potrebno ukloniti, a također omogućiti vizualizaciju koja će bolje odgovara prirodi prostornih deformacija. Postupak maskiranja je proveden pomoću Stack operatera. Dobivene produkte je moguće implementirati u neki od GIS programa kao što su QGIS ili Google Maps. Zbog jednostavnosti korišten je Google Earth za kojega je potrebno provesti željenu vizualizaciju u SNAP-u za razliku od QGIS-a koji nam omogućuje manipulaciju sa unesenim parametrima. Stoga je obrada završena pretvaranjem podataka kmz zapis koji je omogućio prikazu podataka u istražnom prostoru tj. na prostoru grada Zagreba.

## 5. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

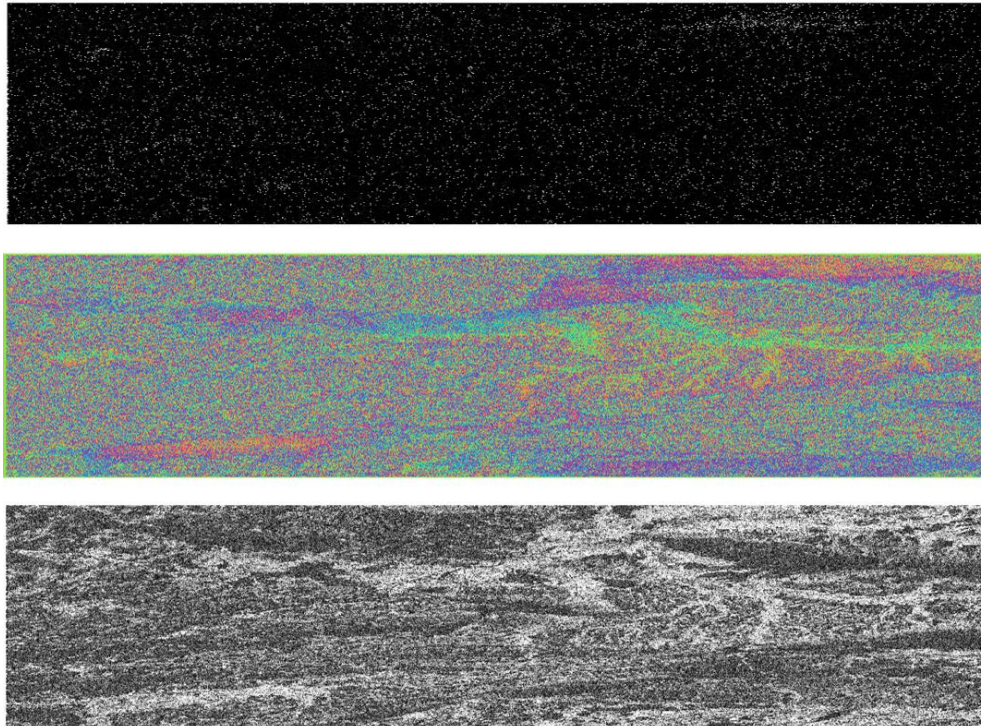
Nakon postupka pred obrade preuzetih proizvoda i izdvajanja podataka potrebnih za daljnju analizu vizualnim prikazom može se vidjeti odabrano područje obrade. Iz prikaza (**slika 5.1**) Sentinel-1A podataka vidljiva su 4 bursta koji su međusobno odvojeni crnom linijom. Svaki burst na svojem rubnom dijelu sadrži iste informacije koje omogućuju njihovo spajanje. Moguće je spojiti i subswath-ove (IW1 i IW2 ili IW2 i IW3) ukoliko im se burst-ovi međusobno poklapaju.



**Slika 5.1** Intenzitet slike Sentinel-1A.

Produkti pred obrade su koherenca primarne i sekundarne slike te intenzitet za Sentinel-1A (**Slika 5.1**) i B koji nam nisu pogodni za prostornu analizu kao „sirovi“ podatak. Iz vizualnog prikaza nije moguće odrediti pojedine karakteristike istraživanog područja pa su proizvodi dalje obrađivani. Kako bi se dobile i raspoznale deformacije tla uzrokovane potresom izrađen je interferogram.

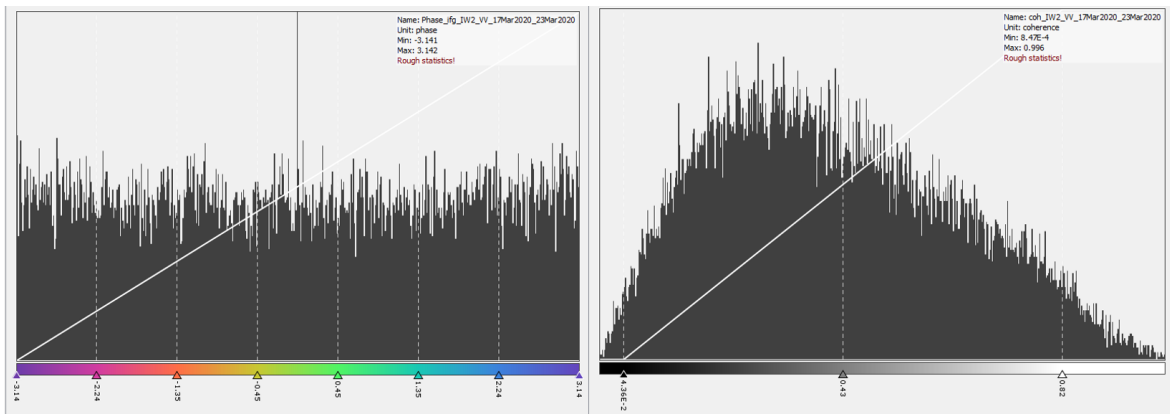




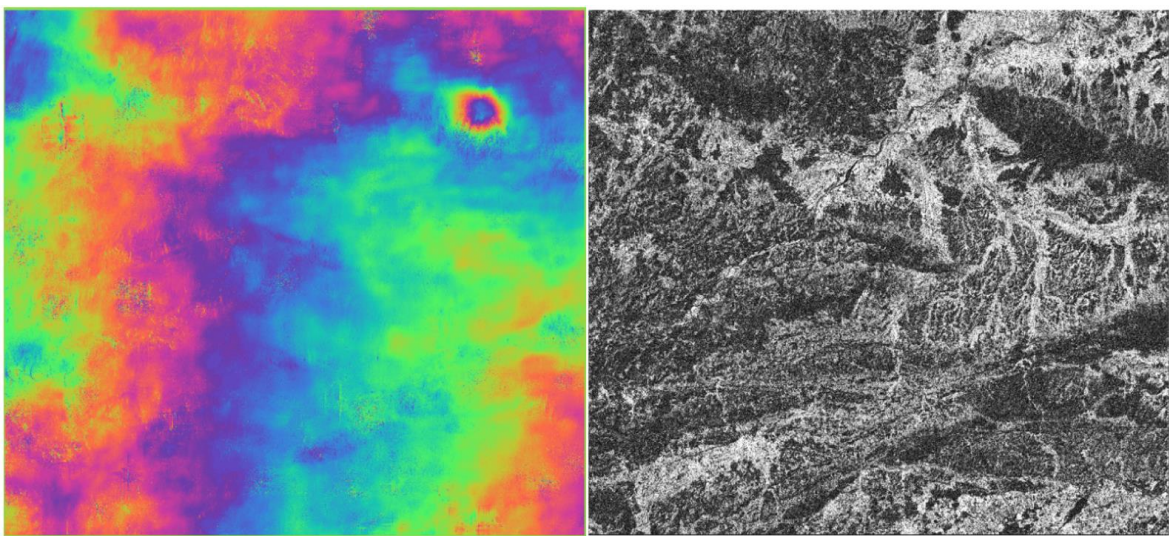
**Slika 5.2** Produkti: intenzitet (gornja), interferometar (srednja), koherentnost (donja).

Dobiveni produkti (**Slika 5.2**) trebali bi sadržati samo varijance uzrokovane deformacijama tla te atmosferske varijance i šumove s obzirom da je topografska faza uklonjena. Koherentnost je u interferometru (**Slika 5.2 srednja**) iskazana kao boje spektra u rasponu od  $-\pi$  do  $+\pi$  koji se pojavljuje u punom  $2\pi$  ciklusu, svaki ciklus predstavlja polovicu valne duljine senzora. Relativni pomaci tla između dvaju točaka se u daljnjem postupku prepoznaju brojanjem rubova ciklusa i množenjem s polovicama valne duljine. Veća gustoća rubova predstavljaju veća opterećenja tla. Koherentnost (**Slika 5.2 donja**) prikazuje područje gdje su fazni podaci koherentni, što znači da se mogu koristiti za mjerenje deformacija i analizu topografije (nije tema ovog rada). Prema histogramu koherentnosti (**Slika 5.3 desno**) može se reći da istražno područje je pretežito prekriveno vegetacijom koji se na prikazu koherentnosti prikazuje kao tamna područja (vrijednosti ispod 0.3) za razliku od urbaniziranog dijela, sa zgradama i poljoprivrednim površinama koji ima visoku koherenciju (vrijednost iznad 0.6). Prema histogramu interferometrijske koherentnosti (**Slika 5.3 lijevo**) uočava se ujednačenost podataka što znači da su podaci podjednako raspoređeni što je ujedno pokazatelj valjanosti snimljenih podataka.



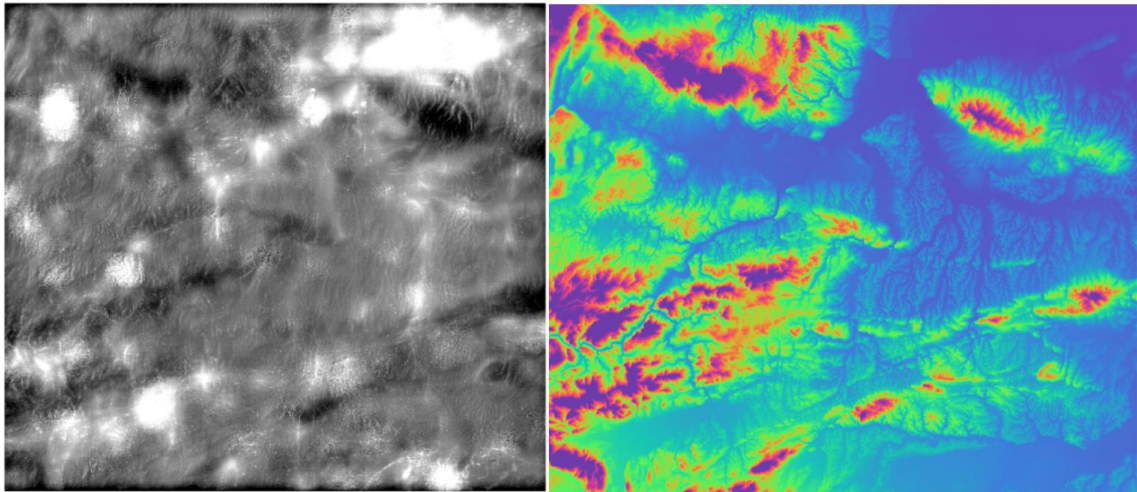


**Slika 5.3** Histogram interferograma (lijevo) i koherentnosti (desno).



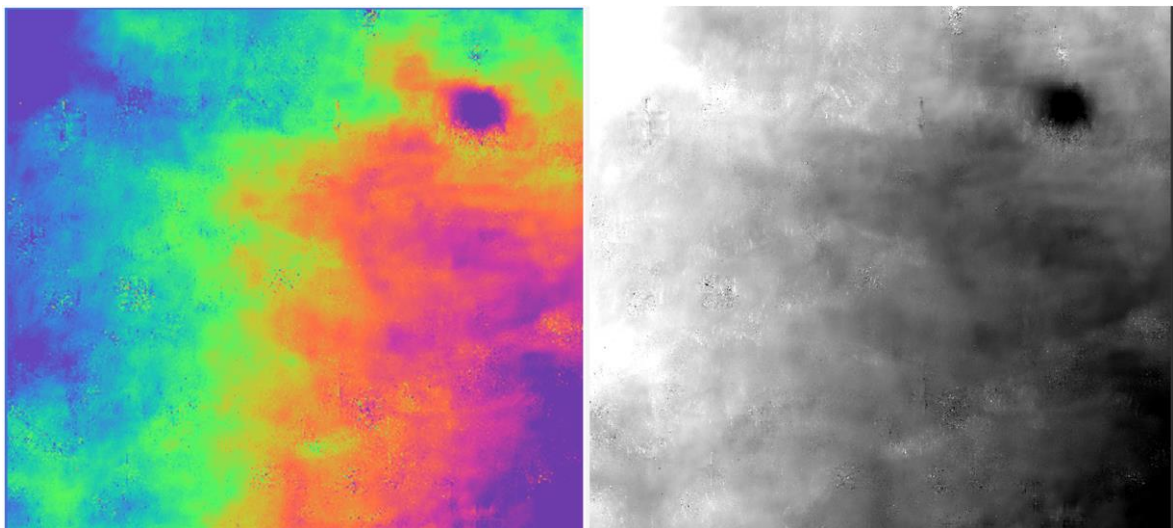
**Slika 5.4** SNAP proizvodi: Interferogram (lijevo) i koherentnost (desno).

Pregledom proizvoda koherentnosti (SRTM-1s s rezolucijom od 30 m), intenziteta i fazne razlike (**slika 5.4 i 5.5**) vidljivo je da su spektralne petlje sada prikazane kvadratnim pikselima, dok su u prethodnim produktima u drugom formatu.



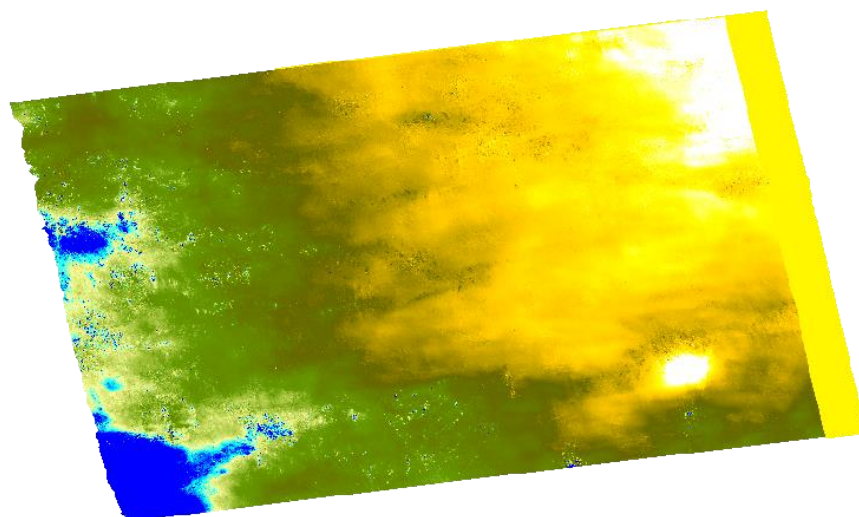
**Slika 5.5** SNAP proizvodi: Intenzitet (lijevo) i topografska faza (desno).

Iz prikaza intenziteta vidljiva su tamna područja, a to su područja niske koherence koje ne uzimamo kao relevantan podatak tj. područja sa visokim stupnjem pokrivenosti vegetacijom. Nasuprot tome područja prikazana su bijelo bojom s visokom koherentnosti su fokus danje obrade.



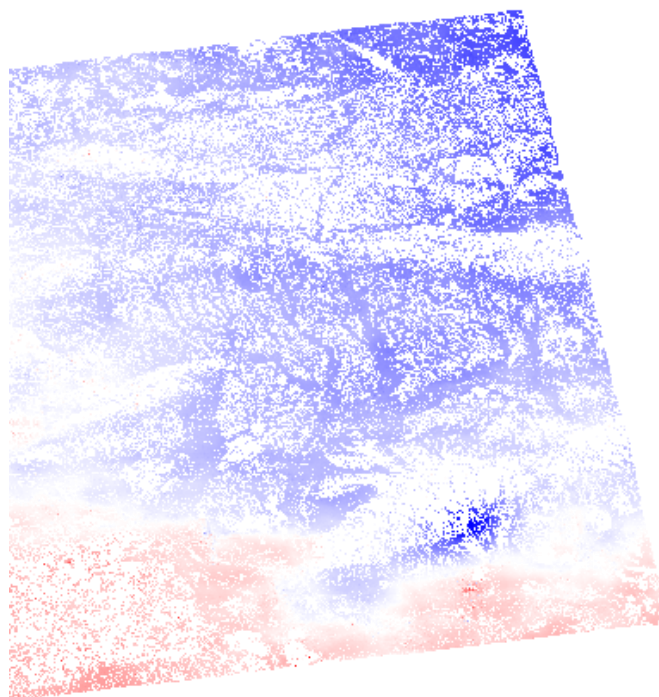
**Slika 5.6** SNAP proizvodi: Interferometrijska razlika faza (lijevo) i faza (desno).

Usporedbom s prethodnim prikazom interferograma može se uočiti kako su uklonjena područja višeznačnosti te da je cijeli interferogram obuhvaćen  $2\pi$  intervalom. Ovaj rasterski prikaz ima ujednačene prijelaze s malim varijacijama osim u području očekivanih strukturnog pomaka.



**Slika 5.7** Obrada podataka Range Doppler Terrain Correction operaterom.

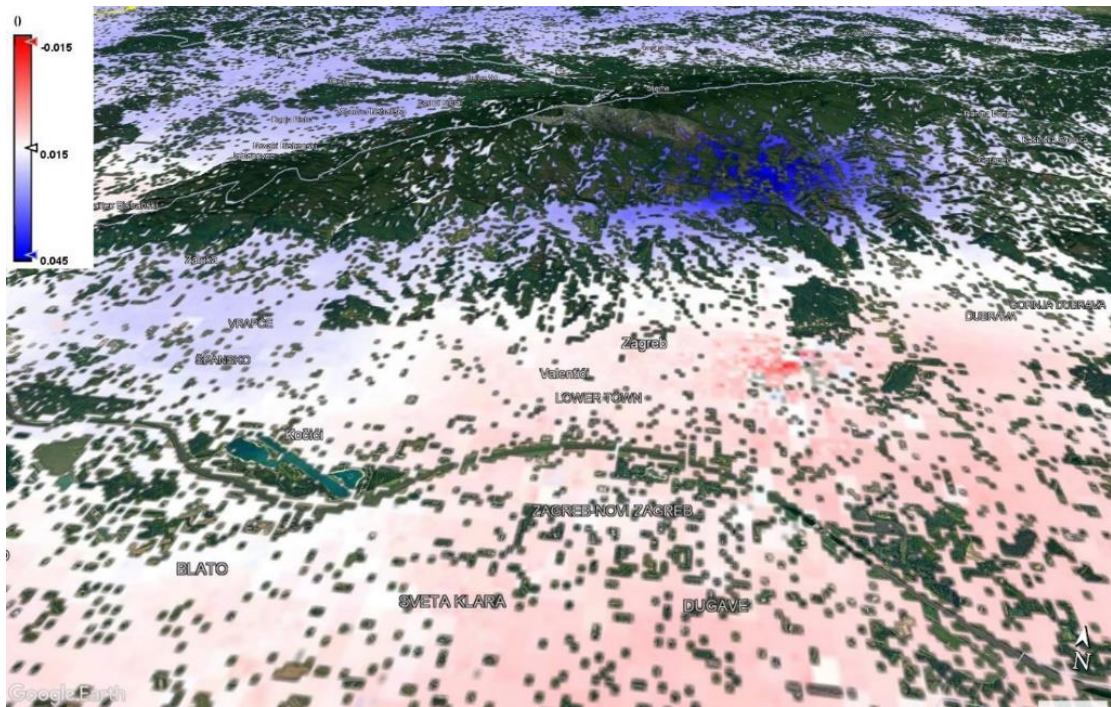
Iz **slike 5.7** vidljiva je značajna razlika u orijentaciji podataka koji sada odgovaraju WGS84 koordinatnom sustavu. Pikseli su vidljiviji (100 m) čime je dobivena nešto jasnija slika deformacija.



**Slika 5.8** Maskiranje podatka pomoću Stack operatera.

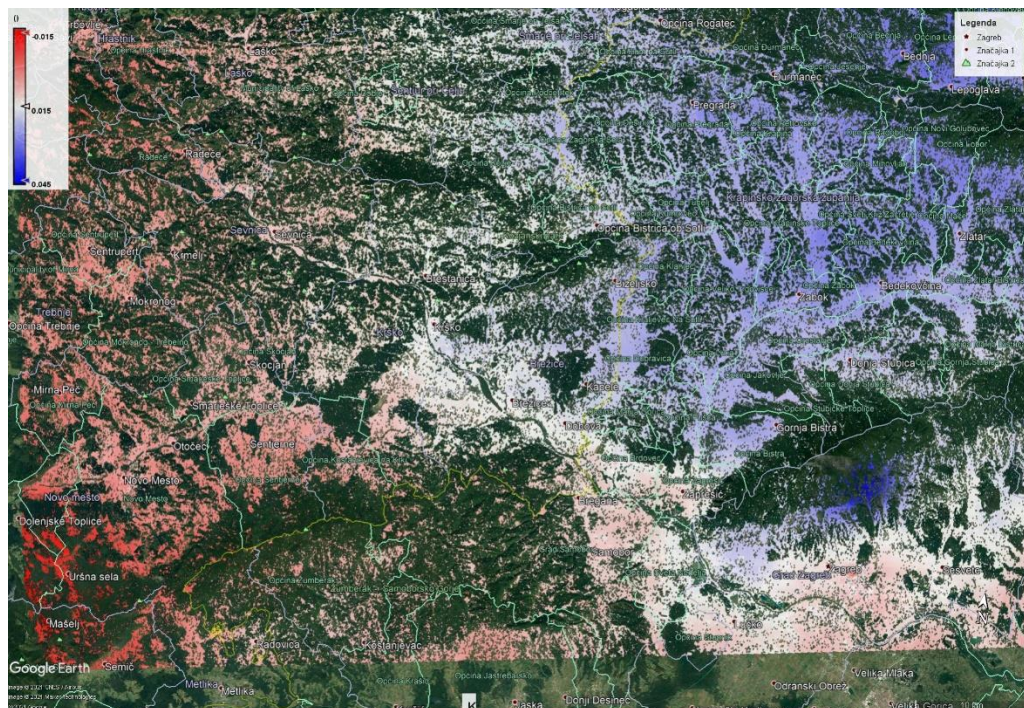
Iz obrade prikazane **slikom 5.8** za koju je korišten Stack operater jasno su vidljiva mjesta nastalih deformacija s obzirom na intenzitet crvene i plave boje, ali nam ne omogućuje određivanje točne prostorne raspodjele.





Slika 5.9 Implementacija maske na području grada Zagreba u Google Earth softverskom programu.

Iz implementiranih podataka u Google Earth (Slika 5.9) jasno se može uočiti područje najvećih deformacija u području Zagreba. Prema ovim implementiranim podacima najveće deformacije su se pojavile u naselju Markuševac, područje intenzivirane plave boje koje predstavlja izdizanje do 4,5 cm. Dok je u naselju Svetice došlo do najvećeg slijezanja do 1,5 cm.



Slika 5.10 Implementacija maske na šire područje u Google Earth softverskom programu.

Ukoliko promatramo cijelo obrađivano područje koje je prikazano na **Slici 5.10** može se uočiti da je u okolnom širem području prema dobivenom prikazu došlo do deformacija.

## 6. ZAKLJUČAK

Korištenje satelita kao izvora geoprostornih podataka omogućava nam prostornu analizu te proučavanje raznih utjecaja na velikom istražnom prostoru. Proučavanje deformacija pomoću radarskih snimaka omogućuje prije svega brzu obradu, kontinuirano praćenje i analizu šireg područja.

Prilikom prikupljanja podataka Sentinel-1 misijom pojavljuju se smetnje koje narušavaju kvalitetu proizvoda, a ponekad su podaci u potpunosti neupotrebljivi. Satelite Sentinel-1 misije nije moguće koristiti u područjima sa visokim postotkom vegetacije, prilikom loših meteoroloških uvjeta te pri pojavi deformacija tla koje prelaze  $2\pi$  spektralni interval. Prije svake primjene podataka snimanja potrebno ih je očistiti od raznih šumova i ostalih utjecaja. Čišćenje podataka se radi vrlo intuitivno odnosno iskustveno pomoću SNAP aplikacije koja još uvijek sadrži neke softverske probleme koje nije moguće riješiti bez odličnog poznavanje strukture računala. Svaku analizu treba provoditi sa visokom stručnošću s obzirom na kompleksnost i utjecajnost raznih čimbenika kako na prikupljene podatke tako i na interpretirane rezultate za koju softverski ne postoje univerzalno rješenje već samo iskustvenost.

Unatoč tome sam program pruža mnoge mogućnosti koje je osigurao širokom paletom alata. Za bolje razumijevanje SNAP softvera i njegovu implementaciju Copernicus je osigurao niz online edukacija i vodiča u kojima se objašnjava korištenje alata na raznim stvarnim problemima. Pa kao stoga mogu reći kako je uporaba ovog softvera odličan način učenja i analiziranja prostornih podataka pomoću složenih metoda. Kao rezultat obrade satelitskih snimaka Sentinel-1A i B dobiveni su rezultati koji se proporcionalni prethodno provedenom istraživanju Markušić i dr. (2020.) koji je iste tematike, potresa u Zagrebu 22.3.2020. Pa možemo zaključiti kako je obrada podataka bila uspješna te se ova tehnika može primjenjivati na istovjetnu problematiku. Također se postupak može dovesti na višu razinu što se tiče preciznosti i točnosti mjerenja pomoću sinergije s drugim geodeskim tehnikama i tehnologijama.

## 7. LITERATURA

- 1) DE ZAN, F., GUARNIERI, A., M. 2006. *TOPSAR: Terrain Observation*. IEEE Geoscience and Remote Sensing magazine, 44(9), str. 2352-2360.
- 2) DÜZGÜN, H., S., DEMIREL, N. 2011. *Remote Sensing of the Mine Environment*. Florida: CRS Press.
- 3) ESA - THE EUROPEAN SPACE AGENCY. 2021. Technical Guides: Sentinel-1 SAR.
- 4) GOLDSTEIN, R., M., WERNER, C., L. 1998. *Geophysical Research Letters*. 25(21), str. 4035-4038.
- 5) MCCARTHY, D., D. 1996. *IERS conventions*. Pariz: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 21(2), str.1-97.
- 6) HANSEN, R., F. 2002. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- 7) KARADIMOU, G. 2020. *RUS Demo: Land Subsidence mapping using Sentinel-1* RUS Copernicus Training 2020. Copernicus „Eye on Earth“ Roadshow, 4. izdanje.
- 8) KRAMER, H., J. 2002. *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- 9) MARKUŠIĆ, S., STANKO, D., KORBAR, T., BELIĆ, N., PENAVA, D., KORDIĆ, B. 2020. *The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020*. Geosciences 2020, 10(7).
- 10) MORIER, A., IRAOLA, P., P., YOUNIS, M., KRIEGER, G., HAJNSEK, I., PAPANATHANASSIOU, K., P. 2013. *A tutorial on synthetic aperture radar*. IEEE Geoscience and Remote Sensing magazine 1.1.

- 11) SKOLNIK, M., I. (1962.). *Introduction to Radar Systems*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha
- 12) STRICKLAND, D., MOUROU, G. (1985.). *Compression of amplified chirped optical pulses*. Publikacija. Amsterdam: Elsevier B.V., 55(6), str. 447-449.
- 13) ULABY, F., T., LONG, D., G. 2014. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. Michigan: The University of Michigan Press.
- 14) WRIGHT, P., STOW, R. 1999. *Detecting mining subsidence from space*. International Journal of Remote Sensing, 20(6), str. 1183-1188.

#### WEB izvori

- 15) COPERNICUS. *Overview*.  
URL: <https://scihub.copernicus.eu> (10.8.2021.)
- 16) HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA. *Radar*.  
URL: <https://www.enciklopedija.hr> (1.9.2021.)
- 17) ESA. *TOOLBOXES: SNAP*.  
URL: <https://step.esa.int> (3.8.2021.)





KLASA: 602-04/21-01/161  
URBROJ: 251-70-11-21-2  
U Zagrebu, 13.09.2021.

**Mario Bočkor, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/161, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 30.04.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### ODREĐIVANJE POVRŠINSKIH POMAKA TLA UZ POMOĆ INSAR SENTINEL-1 SATELITSKIH PODATAKA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Ivan Medved nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Doc.dr.sc. Ivan Medved

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)