

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Rojko, I., 2016. Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Oštir, K., somentor Čotar, K.): 59 str.

Datum arhiviranja: 17-03-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Rojko, I., 2016. Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Oštir, K., co-supervisor Čotar, K.): 59 pp.

Archiving Date: 17-03-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
GEODEZIJA IN  
GEOINFORMATIKA**

Kandidatka:

**IRENA ROJKO**

**UPORABA DIFERENCIALNE RADARSKE  
INTERFEROMETRIJE ZA OPAZOVANJE PREMICOV  
POVRŠJA**

Magistrsko delo št.: 12/II.GIG

**APPLICATION OF DIFFERENTIAL RADAR  
INTERFEROMETRY FOR LAND DISPLACEMENT  
MONITORING**

Graduation – Master Thesis No.: 12/II.GIG

**Mentor:**

izr. prof. dr. Krištof Oštir

**Somentor:**

Klemen Čotar, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 10. 03. 2016

Ta stran je namenoma prazna.

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **IRENA ROJKO** izjavljam, da sem avtorica magistrske naloge z naslovom:  
»Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 29. februar 2016

Irena Rojko

## BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

<b>UDK:</b>	520.872:528.7(497.4)(043)
<b>Avtorica:</b>	Irena Rojko
<b>Mentor:</b>	Izr. prof. dr. Krištof Oštir
<b>Somentor:</b>	Klemen Čotar, univ. dipl. inž. el.
<b>Naslov:</b>	Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja
<b>Tip dokumenta:</b>	Magistrsko delo
<b>Obseg in oprema:</b>	59 str., 11 pregl., 49 sl., 2 pril.
<b>Ključne besede:</b>	SAR, koherenca, diferencialna radarska interferometrija, Snap, posedanje

### Izvleček

Tehnologija SAR je zaradi relativne cenovne učinkovitosti in tehničnih lastnosti, ki omogočajo opazovanje velikih območij, postala zelo priljubljena. Brezplačen dostop do podatkov SAR Sentinel-1, satelita Evropske vesoljske agencije, je izjemno dobrodošel. V sklopu magistrskega dela nas je zanimalo, v kolikšni meri se jih da s tehniko diferencialne radarske interferometrije (DInSAR) uporabiti za spremljanje premikov na območju Slovenije, ki ima ob visokem deležu gozda pričakovano nizko koherenco. V prvem delu magistrskega dela smo analizirali vrednost koherence med zaporednimi posnetki skozi leto glede na rabo tal. V drugem delu smo v obdobjih z ugotovljeno najboljšo koherenco opazovali premike s tehniko DInSAR. Zaradi značilnih posedanij premogovniških mest smo za testno območje izbrali Velenje z okolico. Rezultate smo primerjali z rezultati GNSS meritev. V prvem delu smo ugotovili, da je najboljša koherenca med zaporednimi posnetki v mesecih med novembrom in marcem, oziroma v času, ko vegetacija miruje. Koherenca dosega najboljše rezultate v zimskem obdobju brez snega in sicer na urbanih območjih in njivah. V drugem delu smo posedanje pravega reda velikosti dobili šele, ko smo testno območje zmanjšali na majhen urbani del Šaleške doline. Kot problematična se je izkazala nizka koherenca, ki negativno vpliva na uspeh razvijanja faze. Le-to je samo po sebi zelo občutljiv postopek. Nadalje ocenjujemo, da je rezultate poslabšal tudi atmosferski vpliv, ki ga z uporabljenimi metodo ne moremo oceniti in odstraniti. Rezultati tega magistrskega dela naj služijo kot izhodišče tistim, ki se bodo v prihodnje odločili za uporabo podatkov Sentinel-1 za radarsko interferometrijo na območjih z gosto vegetacijo.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	520.872:528.7(497.4)(043)
<b>Author:</b>	Irena Rojko
<b>Supervisor:</b>	Assoc. Prof. Krištof Oštir, Ph.D.
<b>Cosupervisor:</b>	Klemen Čotar
<b>Title:</b>	Application of differential radar interferometry for land displacement monitoring
<b>Document type:</b>	M. Sc. Thesis
<b>Notes:</b>	59 p., 11 tab., 49 fig., 2 ann.
<b>Key words:</b>	SAR, coherence, differential radar interferometry, Snap, subsidence

**Abstract**

SAR technology is popular due to its relative cost-efficiency as it enables users to monitor vast areas. Free access to SAR data obtained by satellite Sentinel-1 of European Space Agency is a remarkable opportunity. In this study, we are testing the differential interferometry technique (DInSAR) in the area of Slovenia, known for its dense vegetation that results in low coherence and influences results greatly. In the first part of the study, we analyzed interferogram coherence values throughout the year for different land use. We concluded that coherence reaches its highest values between November and March, when there is no snow, on urban areas and on arable land. We used interferograms with best coherence in the second part of the study, where we measured subsidence due to mining activity in the area of Velenje. We compared subsidence results of DInSAR to those of GNSS measurements. To gain acceptable results in the second part of our study, we had to reduce the test area down to a small urban part of Šaleška valley. Some of the final DInSAR results were close to the GNSS subsidence values. Low coherence and problematic phase unwrapping reduced the quality of our results greatly, but we estimate that atmospheric influence on phase has also contributed to the data quality degradation. Results of this study offer a good starting point for those who wish to use Sentinel-1 data for radar interferometry, especially in areas with dense vegetation.

## ZAHVALA

Ob zaključku magistrske naloge bi se rada iskreno zahvalila mentorju izr. prof. dr. Krištofu Oštirju in somentorju Klemnu Čotarju. Hvala za vsa poučna srečanja, hitro odzivnost in na splošno za zelo pozitivno izkušnjo, v sklopu katere sem se veliko naučila.

Skozi leta študija geodezije sta mi s svojimi nasveti in mentorstvom pomagali izkoristiti moj potencial doc. dr. Mojca Kosmatin Fras in izr. prof. dr. Anka Lisec. Zahvaljujem se vama za nezanemarljivo vrednost, ki sta jo dodali mojemu študiju.

»Hvala staršem, da ste mi omogočili študij« mi je vedno zvenelo nekoliko klišejsko. Študij sta mi veliko več kot le omogočila in omogočila sta mi veliko več kot le študij. Hvala vama za vso podporo.



## KAZALO VSEBINE

<b>IZJAVA O AVTORSTVU .....</b>	<b>IV</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>V</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION .....</b>	<b>VI</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Namen naloge .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Zgradba naloge.....</b>	<b>4</b>
<b>2 OSNOVNI TEORETIČNI POJMI.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Osnove tehnologije SAR .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1 EMV v tehnologiji SAR .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2 Podoba SAR.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 SAR interferometrija .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1 Osnove radarske interferometrije .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2 Koherenca interferograma .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.3 Razvijanje faze .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Diferencialna interferometrija .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1 Osnove diferencialne interferometrije .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2 Izdelava diferencialnega interferograma.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3 Sorodni primeri uporabe diferencialne interferometrije .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Sentinel-1.....</b>	<b>22</b>
<b>3 VIRI PODATKOV .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Izbira podatkov in dostop do njih .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Popolnost podatkov .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 Podatki o rabi tal.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 Izbira testnega območja.....</b>	<b>28</b>
<b>3.5 Kontrolni podatki GNSS izmere.....</b>	<b>28</b>

<b>4</b>	<b>METODOLOGIJA OBDELAVE PODATKOV .....</b>	<b>31</b>
4.1	Metodologija analize koherence glede na čas v letu in rabo tal .....	31
4.2	Metodologija opazovanja premikov z diferencialno interferometrijo.....	32
<b>5</b>	<b>REZULTATI IN ANALIZA.....</b>	<b>34</b>
5.1	Spreminjanje koherence glede na rabo tal in čas snemanja.....	34
5.2	Uporaba diferencialne interferometrije .....	38
5.2.1	Diferencialni interferogram za večje izbrano območje.....	40
5.2.2.	Diferencialni interferogram za manjše izbrano območje .....	49
5.3	Možni razlogi za težave .....	51
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>53</b>
	<b>PRILOGA A: POSTOPEK OBDELAVE PO KORAKIH.....</b>	<b>55</b>
A.1	Izdelava interferograma in izračun srednje vrednosti koherence .....	56
A.2	Od interferograma do razvijanja faze .....	58
A.3.	Izračun premikov .....	58
	<b>PRILOGA B: KOMENTAR NA UPORABLJENO PROGRAMSKO OPREMO .....</b>	<b>60</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>61</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz tržnih cen podob SAR za satelita TerraSAR-X in Cosmo-SkyMed.....	2
Preglednica 2: Pregled dostopnosti in sprememb območja za tirnico 146. ....	26
Preglednica 3: Vertikalni premiki točk GNSS mreže – 1. del. ....	30
Preglednica 4: Vertikalni premiki točk GNSS mreže – 2. del. ....	30
Preglednica 5: Pregled histogramov za testna območja. ....	37
Preglednica 6: Preleti, izbrani za diferencialno interferometrijo. ....	38
Preglednica 7: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za jesen brez uporabe večkratnih pogledov. ....	43
Preglednica 8: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za jesen z uporabo večkratnih pogledov. ....	44
Preglednica 9: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za pomlad brez uporabe večkratnih pogledov. ....	46
Preglednica 10: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za pomlad z uporabo večkratnih pogledov. ....	48
Preglednica 11: Povprečen premik za interferograme majhnega območja.....	51

## KAZALO SLIK

Slika 1: Primer uporabe podatkov Sentinel-1 za spremljanje seizmičnih pojavov: diferencialni interferogram.....	3
Slika 2: Prikaz pasivnega na levi in aktivnega senzorja na desni.....	6
Slika 3: Osnovni pojmi SAR snemanja.....	7
Slika 4: Spekter EMV in podrobnejša delitev frekvenc, ki se uporabljajo v satelitskih sistemih.....	8
Slika 5: Vdorna globina žarka za pas X, C in L pri različnih tipih površja – vegetaciji, suhi prsti in ledu.....	8
Slika 6: Pregled SAR satelitov od leta 1992 do danes in napovedi za prihodnost.....	9
Slika 7: Potek merjenja faze.....	10
Slika 8: Primer zrnatosti pred in po uporabi filtra.....	10
Slika 9: Primeri popačenj: na zgornjih slikah so prikazane skice, na spodnjih pa primeri popačenih podob - približevanje na levih, prevračanje na sredinskih in sence na desnih dveh slikah.....	11
Slika 10: Geometrija SAR interferometrije.....	13
Slika 11: Faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015.....	14
Slika 12: Faza delnega območja Štajerske za interferometrični par 15. 10. 2014 - 27. 10. 2014.....	14
Slika 13: Koherenca za interferometrični par Egipta 17. 8. 2015 – 29. 8. 2015.....	15
Slika 14: Faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015 po uporabi večkratnih pogledov – levo, ki jim je sledila uporaba filtriranja – desno.....	16
Slika 15: Razvita faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015 – levo in koherenca istega območja – desno.....	17
Slika 16: Posedanje in dviganje terena kot posledica potresa. Območje zgoščenih kolobarjev pomeni premik, barvno homogena območja pa predstavljajo relativno mirujoča območja.....	18
Slika 17: Model letnih premikov na območju Velenja.....	21
Slika 18: Sentinel-1A.....	22
Slika 19: Načini senzorja Sentinel-1.....	23
Slika 20: Iskalnik Sentinelovih podatkov SSDH.....	24
Slika 22: Razrez podobe SAR na tri podpase.....	27
Slika 23: Točke GNSS mreže v okolici Velenja.....	29
Slika 24: Metodologija prvega dela naloge: analize koherence glede na čas v letu in rabo tal.....	31
Slika 25: Prikaz metode drugega dela naloge: opazovanje premikov z diferencialno interferometrijo.....	33
Slika 26: Območje za spremljanje vrednosti koherence.....	34
Slika 27: Graf srednje vrednosti koherence za interferometrične pare v obdobju 15. 10.2014 – 3. 11. 2015, za celotno izbrano testno območje.....	35
Slika 28: Izbrane tri kategorije rabe tal na testnem območju.....	36
Slika 29: Graf srednje vrednosti koherence glede na rabo tal.....	36
Slika 30: Testni območji za diferencialno interferometrijo: pravokotnik prikazuje veliko uporabljeno območje, bela poligona pa manjše uporabljeno območje.....	39
Slika 31: Razvita faza za interferogram 14. 12. 2014 – 26. 12. 2014 na izbranem testnem območju.....	39
Slika 32: Razvita faza za interferogram 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014 na izbranem testnem območju.....	40
Slika 33: Primeri ocen razvijanja faze: po vrsti od ocene 5 do ocene 1.....	41
Slika 34: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - jesen brez uporabe večkratnih pogledov.....	42

Slika 35: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014, brez uporabe večkratnih pogledov. ....	42
Slika 36: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - jesen z uporabo večkratnih pogledov. ....	43
Slika 37: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014, z uporabo večkratnih pogledov. ....	44
Slika 38: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - pomlad brez uporabe večkratnih pogledov. ....	45
Slika 39: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 20. 3. 2015 – 2. 4. 2012, brez uporabe večkratnih pogledov. ....	45
Slika 40: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - pomlad z uporabo večkratnih pogledov. ....	47
Slika 41: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 20. 3. 2015 – 2. 4. 2012, z uporabo večkratnih pogledov. ....	47
Slika 42: Graf absolutne vrednosti napake v premiku glede na koherenco, prikazani so podatki vseh GNSS točk iz štirih diferencialnih interferogramov, razen referenčnih točk. ....	49
Slika 43: Poligoni z dobro koherenco in dobrim razvijanjem faze vseh štirih diferencialnih interferogramov (sivi) in končni poligon, njihov presek, uporabljen za majhno območje opazovanja premikov (črn). ....	49
Slika 44: Diferencialni interferogram za majhno območje: jesen brez uporabe večkratnih pogledov. ....	50
Slika 45: Diferencialni interferogram za majhno območje: jesen z uporabo večkratnih pogledov. ....	50
Slika 46: Diferencialni interferogram za majhno območje: pomlad brez uporabe večkratnih pogledov. ....	50
Slika 47: Diferencialni interferogram za majhno območje: pomlad z uporabo večkratnih pogledov. ....	50
Slika 48: Osnovni pogled v programu Snap. ....	55
Slika 49: Graf v Graph Builderju programa Snap – od začetka procesiranja pa do interferograma, pripravljena na obrez. ....	57

## KRATICE

DInSAR	Differential interferometric SAR
DMP	Digitalni model površja
ERS-1	European Remote Sensing Satellite 1
ERS-2	European Remote Sensing Satellite 2
Esa	European Space Agency
EMV	Elektromagnetno valovanje
EW	Extra wide swath način senzorja Sentinel-1
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistemi
InSAR	Interferometric SAR
IW	Interferometric wide swath način senzorja Sentinel-1
LOS	Line of sight
MKGP	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano
PolSAR	Polarimetric SAR
PSI	Persistent/permanent scatterer InSAR
S1TBX	Sentinel-1 Toolbox
SAR	Satellite Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SM	Stripmap način senzorja Sentinel-1
Snap	Sentinel Application Platform
SSDH	Sentinels Scientific Data Hub
WGS84	World Geodetic System 1984
WV	Wave način senzorja Sentinel-1

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

Daljinsko zaznavanje je skozi desetletja pridobilo na veljavi in uporabi. Z njim si pomagamo tako pri vsakdanjih opravilih kot pri reševanju kompleksnejših družbenih problemov. Na nek način jemljemo podatke, pridobljene z daljinskim zaznavanjem za samoumevne, po drugi strani pa je visok strošek pridobivanja in zato tudi običajno visoka cena teh podatkov lahko razlog za počasnejši napredek v uporabi podatkov in posledično počasnejši napredek družbe. Problematični so lahko tudi različni standardi za prostorske podatke in težje preverljiva kakovost, kadar uporabljamo različne, tuje vire podatkov.

V Evropski uniji se je skozi čas pokazala potreba po enotnem sistemu za upravljanje s prostorskimi podatki. Direktiva INSPIRE od leta 2007 ureja področje čezmejnega sodelovanja med državami pri delu s prostorskimi podatki. Eno od glavnih načel te direktive je, da so podatki na voljo vsakemu, ki jih rabi, če se le da, brezplačno. Direktivi sledi celotna Evropska komisija, v podobnem duhu pa ravna tudi Evropska vesoljska agencija (angl. European Space Agency - Esa).

Esa je mednarodna organizacija z 22 državami članicami in 7 državami s sporazumom o sodelovanju, med katere spada tudi Slovenija. Njena naloga je načrtovanje in izvajanje Evropskega vesoljskega programa, preko katerega države članice dosegajo posamezni državi nedosegljive cilje. Glavni poudarki programa so izvedeti več o Zemlji, njeni bližnji okolici, našem sončnem sistemu, vesolju, razvoj satelitskih tehnologij in s tem povezanih storitev in promocija evropskih industrij (Esa, 2016a). Opazovanje Zemlje s sateliti je pomembno in obsežno področje aktivnosti Ese. Od prvih izstrelitev v šestdesetih letih dvajsetega stoletja pa do danes je Esa izvedla čez 50 vesoljskih misij, velik del le-teh je satelitskih.

Opazovanju Zemlje je posvečen zelo ambiciozen program Copernicus, ki ga skupaj izvajata Evropska komisija in Esa. Namen Copernicusa je zagotoviti točne, pravočasne in lahko dostopne informacije, ki bodo omogočale izboljšanje upravljanja z okoljem, razumevanje in ublažitev učinkov klimatskih sprememb in zagotovitev civilne varnosti. V razvoju je družina satelitov, imenovana Sentineli (angl. Sentinels), ki jo bo sestavljalo 6 satelitov oziroma konstelacij Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5 in Sentinel-6. Vsak od Sentinelov bo imel svojo nalogo in z njo povezano drugačno opremo, potrebno za opazovanje Zemlje (Esa, 2016b).

V magistrski nalogi smo uporabili podatke, pridobljene s Sentinelom-1, ki nosi umetno odprtinski radar (angl. satellite aperture radar - SAR). Posnetki so brezplačno na voljo na spletu, na Esinem spletnem portalu Sentinels Scientific Data Hub (SSDH), prav tako je brezplačno na voljo ustrezna programska oprema. Sentinel-1 z vsakim preletom beleži vrednost realne in imaginarne komponente odbitega elektromagnetnega valovanja (EMV), ki omogoča pridobitev informacije o amplitudi in fazi EMV.

SAR je v uporabi že več kot 30 let. Poznamo predvsem dve platformi za SAR, letalo in satelit, pri čemer slednja prevladuje in je njena uporaba v porastu. Danes tehnologija vstopa v njeno najboljše obdobje doslej, saj še nikoli ni bilo v obratovanju toliko SAR sistemov, več kot 15, v naslednjih 5 letih pa jih bo še za 10 več. Namen tehnologije SAR je spremljati dinamične procese na površju Zemlje na zanesljiv, kontinuiran in globalen način (Moreira in sod., 2013).



Sprva je bil SAR namenjen vojaški uporabi, od prvega SAR satelita, namenjenega civilni uporabi, Seasata, leta 1978, pa je njegov razvoj sunkovito poskočil. Pomembno vlogo pri tem je igral tudi napredek v digitalni tehnologiji. V 90. letih prejšnjega stoletja so izstrelili več civilnih satelitov z nameščenim SAR senzorjem, v 80. in 90. letih pa so razvili danes zelo pomembne SAR tehnike kot na primer polarimetrija (PolSAR), interferometrija (InSAR) in diferencialna interferometrija (DInSAR). Ključen mejnik pomeni tudi začetek uporabe permanentnih sipalcev (angl. permanent/persistent scatterers - PSI) za spremljanje premikov na površju Zemlje. Sodeč po hitrem razvoju, naraščajočem številu SAR satelitov in vse večjih zahtevah po SAR podatkih, je nastopila zlata doba za daljinsko zaznavanje s tehnologijo SAR (Moreira in sod., 2013).

Tehnologija SAR je priljubljena zaradi relativne cenovne učinkovitosti glede na klasične geodetske meritve in izjemnih tehničnih lastnosti, ki omogočajo opazovanje velikih območij, dostopamo pa lahko tako do podatkov iz sedanjosti kot do tistih iz preteklosti (Rucci in sod., 2012). Cene podatkov za komercialne naročnike pa so vseeno razmeroma visoke. Za primer v preglednici 1 podajamo cene SAR podatkov, pridobljenih s satelitoma TerraSAR-X in Cosmo-SkyMed, ki sta komercialno zelo razširjena.

Preglednica 1: Prikaz tržnih cen podob SAR za satelita TerraSAR-X in Cosmo-SkyMed (Airbus Defence & Space, 2016, e-GEOS, 2016).

	Način senzorja	Dimenzije podobe	Ločljivost	Cena novih podatkov *	Cena arhivskih podatkov
TerraSAR-X	SpotLight (SL)	10 km x 10 km	do 2 m	4250 €	2125 €
	StripMap (SM)	30 km x 50 km	do 3 m	2950 €	1475 €
	ScanSAR (SC)	100 km x 150 km	do 18,5 m	1750 €	875 €
Cosmo-SkyMed	Spotlight-2	10 km x 10 km	1 m x 1 m	6000 €	3000 €
	Stripmap HIMAGE	40 km x 40 km	5 m x 5 m **	3000 €	1500 €
	ScanSAR Wide	100 km x 100 km	30 m x 30 m **	1650 €	825 €

\* Manj kot 30 dni po zajemu.

\*\* Ob uporabi večkratnih pogledov.

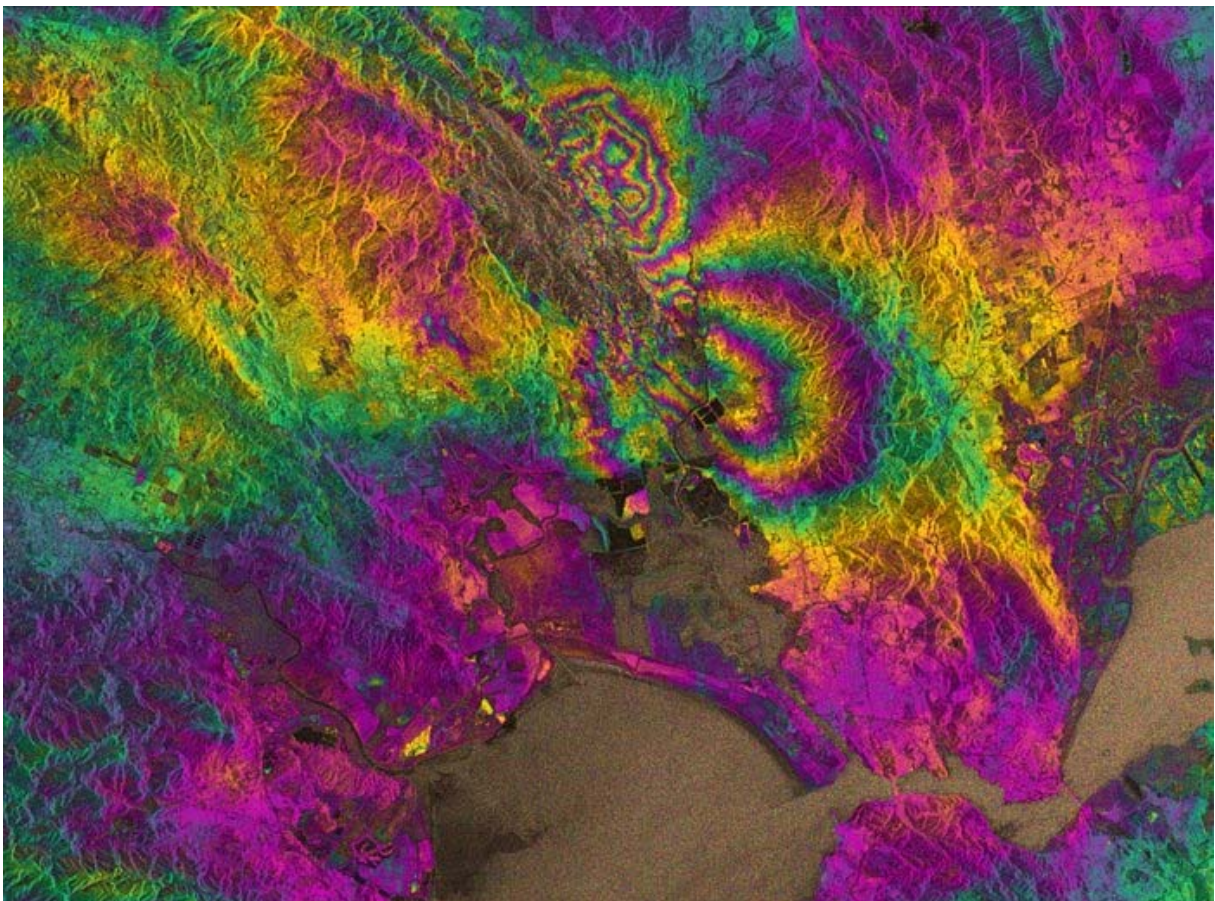
Prav zaradi visokih cen SAR podatkov je brezplačen dostop do podatkov Sentinel-1 izjemno dobrodošel. Na voljo so podatki SAR Sentinel-1 in odprtokodna programska oprema Sentinel Application Platform (Snap), ki skupaj omogočajo najrazličnejšo uporabo. Takšne priložnosti do sedaj še ni bilo in jo je smiselno izkoristiti. V teoriji in praksi poznamo veliko načinov uporabe SAR tehnologije. V tej magistrski nalogi smo se odločili preizkusiti, kako je podatke Sentinel-1 mogoče koristiti na slovenskem območju, ki ima svoje specifike. Uporabili smo tehniko DInSAR, ki lahko z izračunom faznih razlik več preletov istega območja spremlja premike Zemljinega površja. Zanimajo nas potenciali in slabosti te tehnike z izbranimi brezplačnimi podatki in programsko opremo, predvsem pa zanesljivost rezultatov. Le-ti niso samoumevni iz več razlogov:

- tehnika DInSAR je občutljiva in pogosto nezanesljiva na območjih z gosto vegetacijo, kar je tipično za Slovenijo,

- programsko okolje Snap je novo in še v razvoju, uporaba je na trenutke problematična zaradi napak, ki se pojavljajo, in manjkajočih orodij,
- raziskave, ki bi skupaj uporabila SAR podatke Sentinel-1 in programsko opremo Snap, v času izdelave te naloge nismo našli.

Veliko vlogo pri uspehu interferometričnih postopkov ima prisotnost goste vegetacije. Le-ta zmanjšuje koherenco interferograma, to je korelacijo med fazama dveh podob SAR. Koherenca je ključna za uspešno obdelavo podatkov. Prvi del naloge smo zato posvetili koherenci in sicer njeni vrednosti glede na rabo tal in čas v letu. Drugi del naloge smo posvetili ugotavljanju premikov s tehniko DInSAR

Pogosta aplikacija uporabe tehnike DInSAR je spremljanje seizmičnih pojavov. Tipično se s to tehniko meri premik – razliko v stanju pred in po potresu, se pravi posedanje oziroma dviganje površja Zemlje. Značilen primer uporabe tehnike DInSAR je potres v dolini Napa v Kaliforniji, kjer so prvič z uporabo podatkov Sentinel-1 izmerili premik površja. Na sliki 1 je prikazan diferencialni interferogram potresa 24. 8. 2014. Vsak barvni kolobar (od rumene do rumene) pomeni deformacijo terena v smeri gledanja radarja za polovico valovne dolžine, to je 28 mm (Esa, 2016c).



Slika 1: Primer uporabe podatkov Sentinel-1 za spremljanje seizmičnih pojavov: diferencialni interferogram (Esa, 2016c).

Če želimo podatke Sentinel-1, ki so operativno na voljo od oktobra 2014, uporabljati na območju Slovenije, ne bomo spremljali potresne aktivnosti, ker od takrat pa do danes (na srečo) pri nas ni bilo močnejšega potresa. Veliko je tudi področij uporabe tehnike DInSAR ob izbruhih vulkanov (Remy in sod., 2003, Sykioti in sod., 2003), spremljanja ledenikov (Joughin in sod., 1995, Cheng in sod. 2006) in drugih manj oziroma ne relevantnih primerov za Slovenijo. Zasledili pa smo tudi nekaj primerov spremljanja posedanij rudniških območij (Walter in sod., 2009, Ge in sod., 2007).

V nalogi smo se odločili smo se za spremljanje posedanja Velenja, ki je, kot edino slovensko mesto z aktivnim rudarjenjem, primerno za testno območje. Dodaten razlog za izbiro je dejstvo, da zaradi aktivnega premogovništva v Velenju vsako leto opravijo meritve posedanja območja. Obsto terenskih meritev pa je glavni pogoj za vrednotenje uspešnosti izmere premikov s tehniko DInSAR. Posedanje Velenja je na isti način spremljal Oštir (2000) in so nam njegovi rezultati služili za primerjavo. Velenje je ustrezno tudi zaradi zainteresiranosti lokalnih deležnikov za to tematiko.

## 1.1 Namen naloge

Želimo si, da bi z brezplačnimi podatki Sentinel-1 in programsko opremo Snap, ki nam je na voljo, lahko dosegali dobre rezultate. Namen naloge je ugotoviti na kakšen način in v kolikšni meri so podatki in programska oprema v tem trenutku uporabni. Predvsem nas je zanimalo, kako se jih da uporabiti za območje Slovenije, ki ima ob visokem deležu gozda nizko koherenco. V prvem delu raziskave smo analizirali vrednost koherence med zaporednimi posnetki skozi leto glede na rabo tal. Ta informacija bo koristila vsakemu, ki bo v prihodnje želel uporabiti tehniko DInSAR v Sloveniji ali na drugem območju s podobnim podnebjem ali visokim deležem vegetacije. V drugem delu naše raziskave smo v obdobjih z ugotovljeno najboljšo koherenco preizkusili tehniko DInSAR za opazovanje premikov.

Zastavili smo si tri raziskovalna vprašanja:

- Kakšno koherenco lahko pričakujemo glede na rabo tal in čas v letu?
- Katero obdobje v letu je najprimernejše za SAR opazovanja?
- V kolikšni meri je tehnika DInSAR uporabna za spremljanje premikov na območju z gosto vegetacijo?

## 1.2 Zgradba naloge

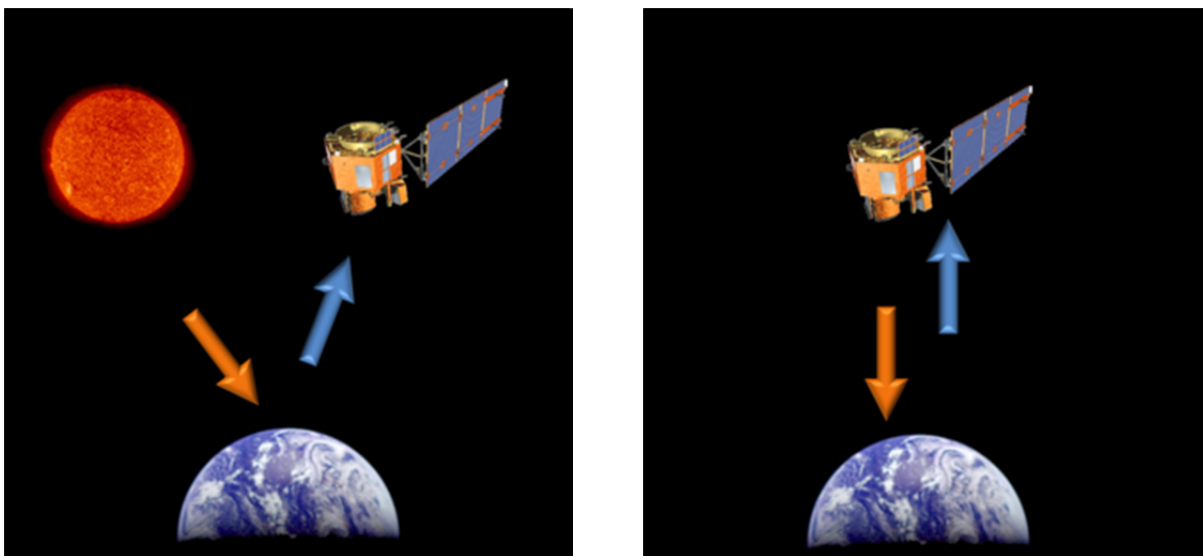
Naloga se po uvodnem poglavju 1 nadaljuje z osnovnimi teoretičnimi pojmi v poglavju 2. Poglavje smo razdelili po sklopih na osnove tehnologije SAR, SAR interferometrijo, diferencialno radarsko interferometrijo in na del o Sentinelu-1 in njegovih podatkih. Poglavje 3 Viri podatkov smo posvetili izbiri podatkov in dostopu do njih, popolnosti podatkov, podatkom o rabi tal, izbiri testnega območja in kontrolnim podatkom GNSS mreže. V poglavju 4 smo obravnavali metodologijo obdelave podatkov. Najprej smo opisali metodologijo prvega dela naloge: analize koherence glede na čas v letu in rabo tal, izdelave interferograma in nadaljevali z metodologijo drugega dela: opazovanjem premikov s tehniko DInSAR. Poglavje 5 predstavljajo rezultati in analiza, ki smo ga zopet razdelili na

dva vsebinska dela naloge. Zapisali smo še možne razloge za težave. Delo zaključujemo s poglavjem 6, kjer podajamo glavne sklepe naloge. V prilogi A se nahaja postopek obdelave po korakih, v prilogi B pa komentar na uporabljeno programsko opremo.

## 2 OSNOVNI TEORETIČNI POJMI

### 2.1 Osnove tehnologije SAR

SAR je aktiven senzor, pritrjen na gibajočo se platformo – letalo ali satelit. Da je senzor aktiven, pomeni, da v nasprotju s pasivnim senzorjem pri procesu zaznavanja ne potrebuje zunanjega vira osvetlitve opazovanega objekta, na primer sončne svetlobe. Aktiven senzor je namreč sam vir EMV, zato lahko snema kadarkoli, neglede na dnevni ali letni čas (Oštir, 2006). Princip pasivnega in aktivnega senzorja je prikazan na sliki 2.

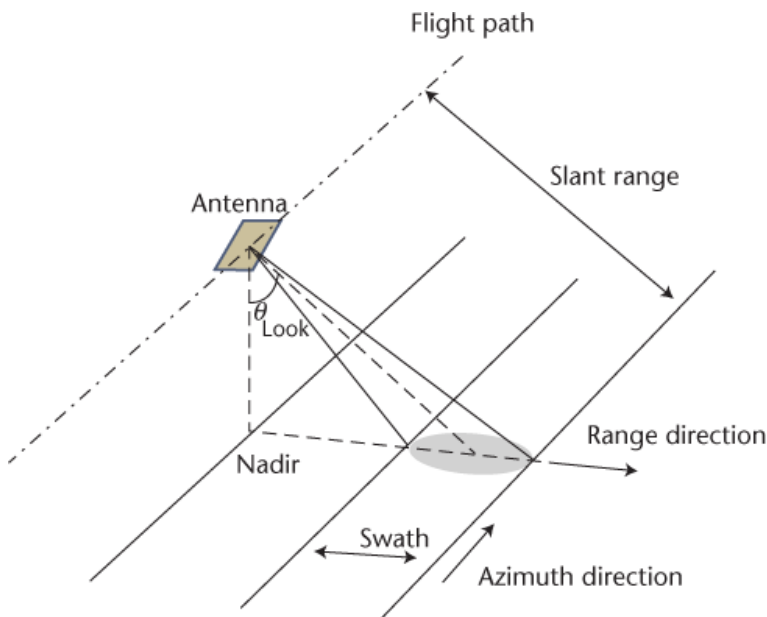


Slika 2: Prikaz pasivnega na levi in aktivnega senzorja na desni (NASA, 2016).

Radarska antena oddaja EMV v smeri Zemlje. To se od površja odbije in le del se ga vrne nazaj proti SAR anteni, ki odbito valovanje sprejme. SAR med premikanjem platforme oddaja in sprejema valove in hkrati beleži svojo lokacijo v prostoru in na ta način navidezno poveča velikost sprejemne antene, s čimer izboljša prostorsko ločljivost posnetkov (Moreira in sod., 2013). SAR v slovenskem prevodu, skladno z opisom delovanja, pomeni umetno odprtinski radar. Za SAR je značilen satelit bočnega pogleda.

Z oddajanjem, sprejemanjem EMV in merjenjem časa potovanja žarka SAR meri razdaljo med senzorjem in točko na površju Zemlje, od katere se je signal odbil. Osvetljeno območje se imenuje odtis (angl. footprint), ki ima dve dimenziji: prvo azimutno oziroma vzdolžno smer, v smeri leta satelita (angl. azimuth direction oziroma along-track direction) in drugo, razdaljo na površju, v smeri prečno na let satelita (angl. ground range direction oziroma across track direction). Liniji gledanja radarja, ki je pravokotna na smer leta, rečemo tudi poševna razdalja (angl. line of sight oziroma slant-range). Razdalja na površju je projekcija poševne razdalje na površje Zemlje. SAR antena se giblje s hitrostjo satelita vzdolž njegove tirnice. Odtis riše na površje Zemlje snemalni pas (angl. swath) v širini razdalje na površju (Ferretti in sod., 2007). Kot med nadirjem in smerjo, ki jo kaže antena, je kot gledanja satelita, kot med središčem radarskega žarka na mestu odboja in med pravokotnico na površje se imenuje vpadni kot. Kot gledanja ima velik vpliv na geometrijo SAR snemanja in končnih izdelkov,

vpadni kot pa, skupaj z lastnostmi terena, vpliva na vrednosti odbitega valovanja. (Gens, 1998). Na sliki 3 prikazujemo opisane osnovne pojme v sistemu SAR.

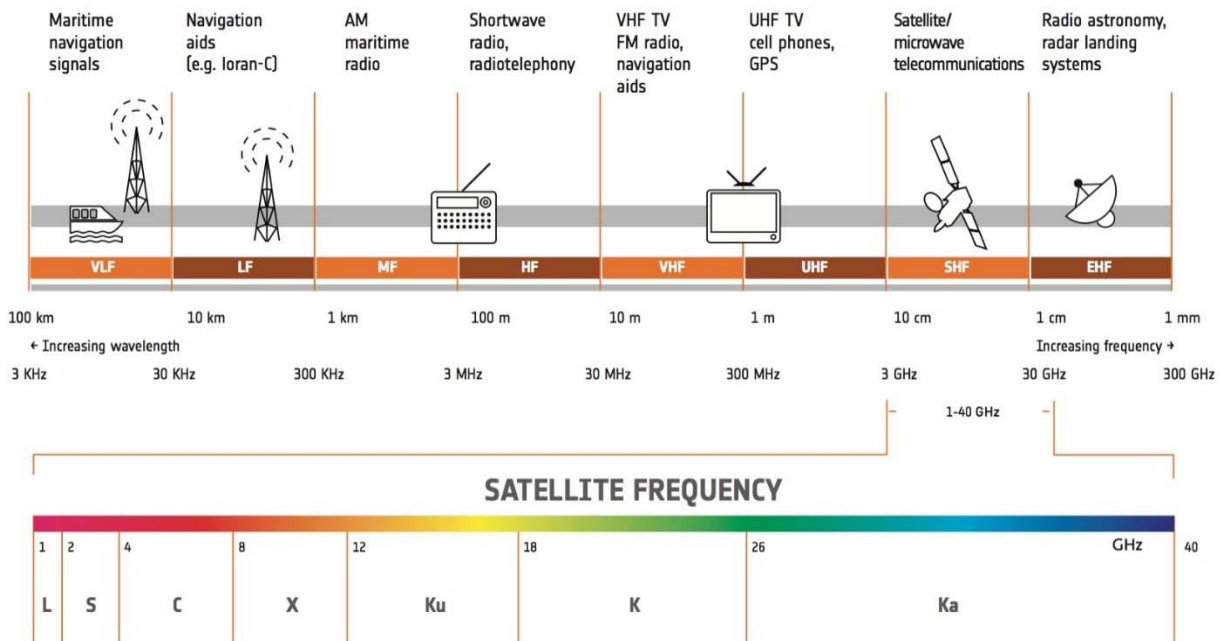


Slika 3: Osnovni pojmi SAR snemanja (Memarsadeghi in sod., 2013).

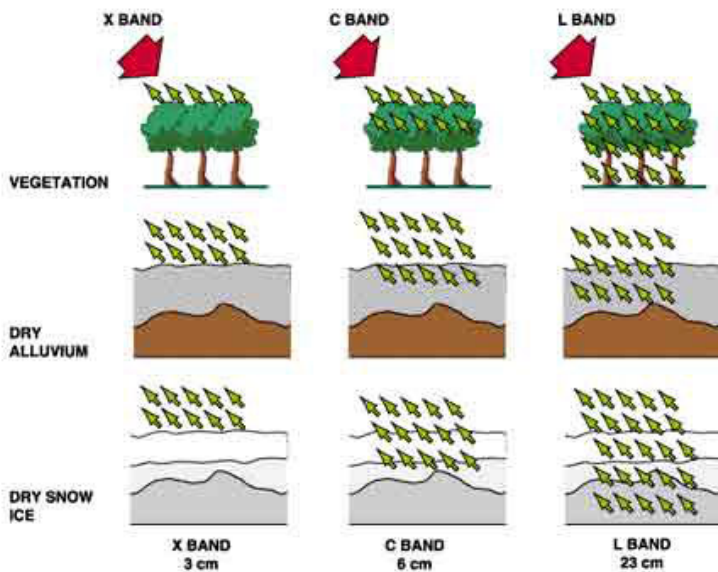
### 2.1.1 EMV v tehnologiji SAR

V daljinskem zaznavanju se zaradi lastnosti atmosfere in dosegljivosti vira valovanja uporablja vidna svetloba, mikrovalovi in infrardeča svetloba (Oštir, 2006). Tehnologija SAR uporablja mikrovalove, ki v spektru EMV spadajo med valovanje z manjšo valovno dolžino (med 1 in 10 centimetri) in ustrezno visoko frekvenco (med 1 in 40 gigaherca). Nadalje se frekvenca, ki se uporablja pri satelitih, deli od največje valovne dolžine (in najmanjše frekvence) do najmanjše valovne dolžine (in največje frekvence) na pasove (angl. bands): L, S, C, X, Ku, K in Ka, izmed katerih se v praksi najpogosteje uporabljajo pasovi L, C in X. Na sliki 4 prikazujemo opisano umestitev mikrovalovanja v spekter EMV in podrobnejšo delitev satelitskih frekvenc (Esa, 2016d).

Valovna dolžina oddanega valovanja določa vdorno globino žarka. Večja kot je valovna dolžina, globlje skozi vegetacijo se žarek prebije. Pas X se siplje predvsem na vrhu krošenj, pas C nekje vmes, pas L pa se prebije skozi vegetacijo in se odbije od tal (Gens, 1998). Podobno velja za suho prst in led, kot je prikazano na sliki 5. Nasploh velja, da imajo urbane površine veliko odbojnost, vegetacija nižjo, najšibkejšo pa mirne vode (Esa, 2016e).

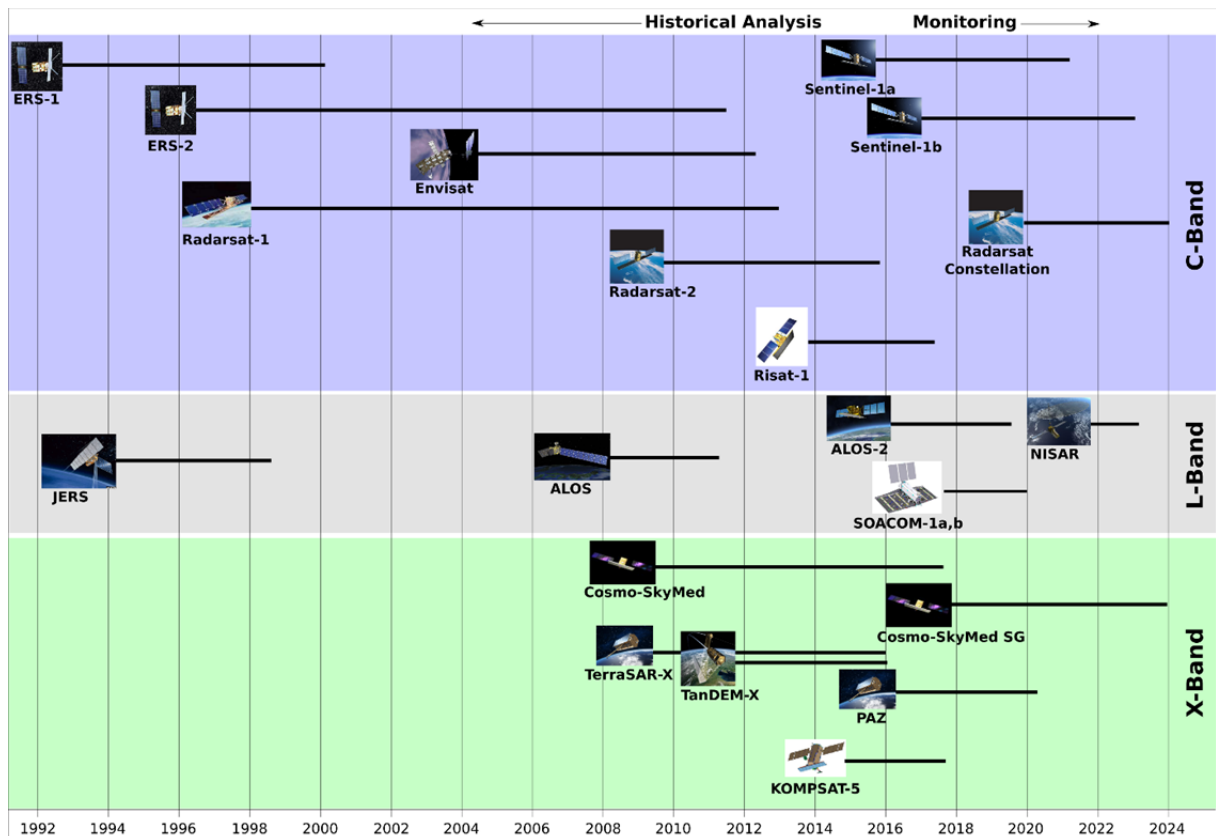


Slika 4: Spekter EMV in podrobnejša delitev frekvenc, ki se uporabljajo v satelitskih sistemih (Esa, 2016d).



Slika 5: Vdorna globina žarka za pas X, C in L pri različnih tipih površja – vegetaciji, suhi prsti in ledu (Esa, 2016e).

Na sliki 6 je prikazan pregled SAR satelitskih misij za sedanost, bližnjo preteklost in napovedane misije za prihodnost. Sateliti so prikazani po pasovih, ki jih uporabljajo. Vidimo, da prevladujeta pas C in pas X. Sentinel-1 bo skupaj s preteklimi podatki pasu C zagotavljal dolgoletno kontinuiteto podatkov, kar je za spremljanje različnih pojavov skozi čas zelo koristno.



Slika 6: Pregled SAR satelitov od leta 1992 do danes in napovedi za prihodnost (UNAVCO, 2015).

### 2.1.2 Podoba SAR

Podoba SAR je rastrska podoba, v kateri vsaka celica (angl. pixel) predstavlja kompleksno število, iz katerega pridobimo informacijo o amplitudi in fazi odbitega valovanja. Velikost rastrske celice je odvisna od sistema. Znotraj posamezne rastrske celice se običajno nahaja več objektov (stavba, drevo, skala, cesta, njiva in drugi), ki vsi vplivajo na vrednost rastrske celice in posledično na vrednost amplitude in faze. Vrstice v podobi SAR predstavljajo azimutno smer, stolpci pa poševno razdaljo. Projekcija rastrske celice v neobdelani podobi SAR na površje Zemlje ni kvadratna, temveč je pravokotna (Ferretti in sod., 2007).

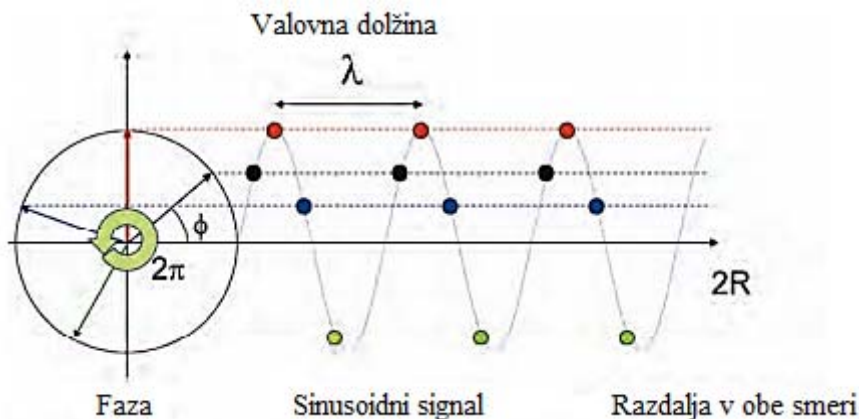
Amplituda je v veliki meri odvisna od grobosti odbojne površine. Tipično bo imelo golo kamenje in urbane površine visoko amplitudo, medtem ko imajo najnižjo vrednost amplitude – zaradi popolnega odboja stran od sensorja – običajno vode. Za opazovanje reliefa in premikov je ključna informacija o fazi. Faza odboja žarka je odvisna od valovne dolžine, ki je za posamezen radarski sistem konstantna ter od razdalje med oddajnikom radarskega valovanja in odbojnikom na Zemlji, ki se z vsako rastrsko celico spreminja. Fazo opiše sinusna krivulja in vedno zavzame vrednost med 0 in  $2\pi$ . Princip merjenja faze je prikazan na sliki 7, vrednost faze pa je definirana z enačbo (Ferretti in sod., 2007):

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R,$$

kjer je:



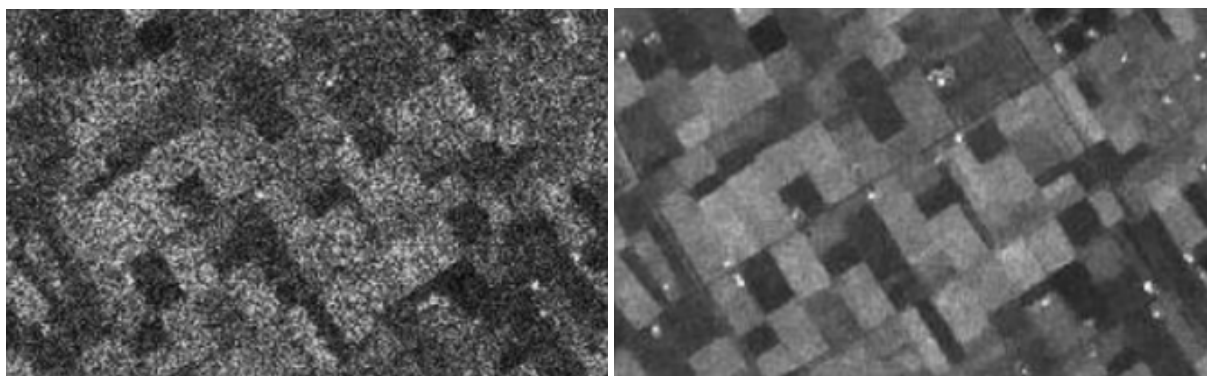
$\phi$ .....faza,  
 $\lambda$ .....valovna dolžina sistema,  
 $R$ .....razdalja senzor-odbojnik v obe smeri.



Slika 7: Potek merjenja faze (Prirejeno po: Ferretti in sod., 2007)

Vrednost faze podaja le zadnji, krajši od valovne dolžine, del vala valovanja, ki se po odboju vrne v merski sistem. Zaradi velikega razmerja med velikostjo rastrske celice in valovno dolžino zavzame faza navidezno naključno vrednost v posamičnem posnetku in nima praktične uporabe, kadar delamo le s podatki enega preleta (Ferretti in sod., 2007).

Prostorska ločljivost SAR definira najmanjšo razdaljo med meritvami, ki jo je senzor sposoben zaznati, in določa nivo zrnatosti (angl. speckle). Zrnatost je lastnost podobe SAR, ki se pojavi, ko je prostorska ločljivost prenizka, da bi bilo mogoče zaznati posamezen objekt (stavbo, drevo, cesto in podobno). Pojavi se vzorec »posejanosti s poprom in soljo«. Višja kot je prostorska ločljivost, več tarč je mogoče razločiti in manjši je pojav zrnatosti, ki vpliva na kakovost in uporabnost podob SAR. Prostorska ločljivost ni isti pojem kot velikost rastrske celice, ki predstavlja razmik med rastrskimi celicami v smeri leta in v smeri razdalje na površju (Gent, 1998). Učinek zrnatosti je mogoče za ceno izgube informacij odpraviti z uporabo digitalnih filtrov (Oštir, 2006) ali pa z uporabo večkratnih pogledov (Ferretti in sod., 2007). Na sliki 8 je prikazana podoba, kjer je prisotna zrnatost (levo) in ista podoba po uporabi filtra, s katerim se zrnatost odpravi (desno).

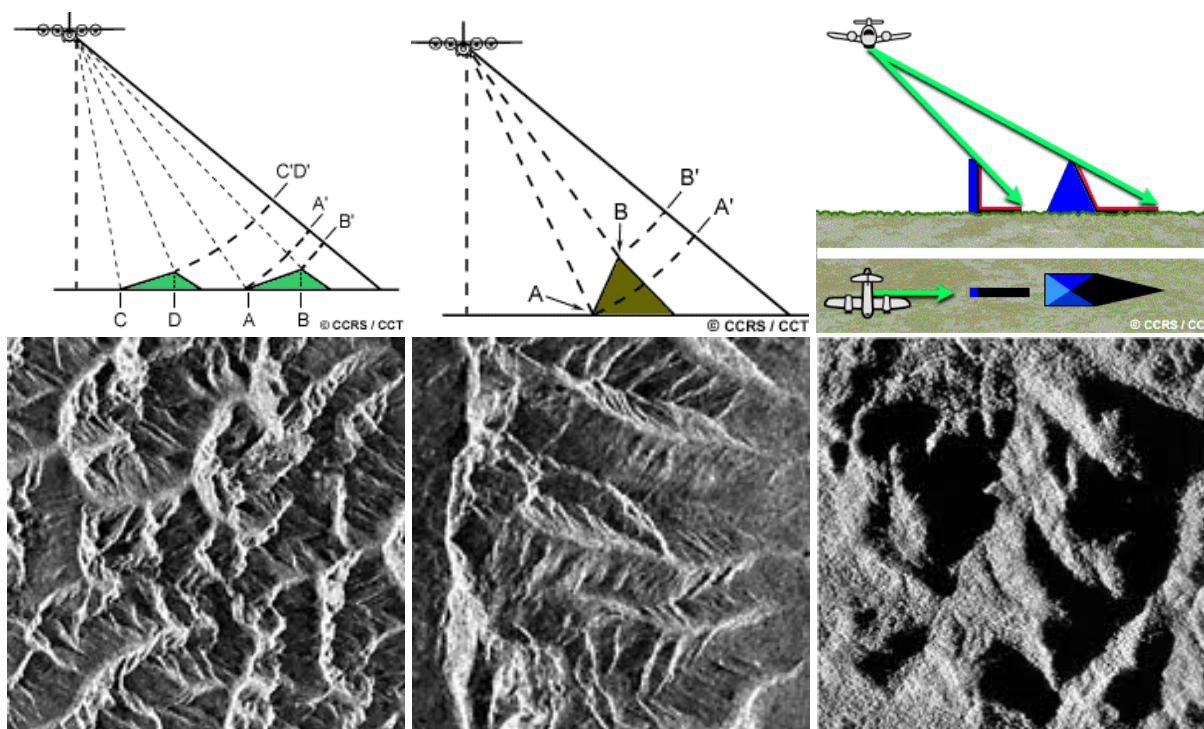


Slika 8: Primer zrnatosti pred in po uporabi filtra (RSDE, 2016).

Velikost rastrske celice, oziroma njene projekcije na površje Zemlje, je odvisna od lokalne topografije. Na višinsko bolj razgibanih območjih je potrebna pozornost pri izbiri podobe SAR s spuščajočo ali dvigajočo tirnico glede na opazovano območje in tamkajšnji nagib terena. Izbira prave vrste tirnice bo zmanjšala prisotnost popačenj, ki se zaradi značilnosti terena lahko pojavijo na podobah SAR in so značilna za strma pobočja hribov in za visoke objekte (Soergel in sod., 2003):

- približevanje (angl. foreshortening) se pojavi, ko radarski žarek prej doseže dno hriba, kot pa vrh in se pobočje navidezno zmanjša, vrh pa se navidezno približa sensorju – največji je vpliv približevanja v primeru, da je pobočje hriba pravokotno na smer gledanja satelita;
- prevračanje (angl. layover) je značilen za strma pobočja obrnjena proti radarju, oziroma za visoke stavbe: pri točkah, ki so na enaki oddaljenosti od sensorja, ne pa na isti geografski lokaciji, se zaradi enake poševne razdalje njihov odboj zapiše v isto rastrsko celico, radarski žarek doseže prej vrh visokega objekta kot pa dno in se vrh tega objekta navidezno prevrne v smeri proti radarju, prevračanje prepoznamo kot zgoščena svetla območja;
- senca (angl. shadow) se pojavi, ko radarski žarek ne more osvetliti določenega dela površja Zemlje, ker se nahaja v senci večjega objekta.

Primeri približevanja, prevračanja in sence so v obliki skic in podob SAR prikazani na sliki 9.



Slika 9: Primeri popačenj: na zgornjih slikah so prikazane skice, na spodnjih pa primeri popačenih podob - približevanje na levih, prevračanje na sredinskih in sence na desnih dveh slikah (NRCan, 2015).

Naslednja pomembna lastnost podatkov tehnologije SAR je polarizacija. Polarizacija se nanaša na orientacijo električnega polja oddanega žarka glede na horizontalno smer. Lahko je vertikalna ali horizontalna. Po odboju žarka na površju Zemlje, se lahko polarizacija spremeni. Zanima nas podatek o polarizaciji za oddajo in sprejemanje valovanja. Poznamo enopolne in dvopolne kombinacije. Enopolne so bolj pogosto uporabljene in so naslednje (Crisp, 2016):

- VV (vertikalna sta oddaja in sprejem valovanja),
- HH (horizontalna sta oddaja in sprejem valovanja),
- HV (oddaja je horizontalna, sprejem vertikalni) in
- VH (oddaja je vertikalna, sprejem pa horizontalni).

Vsaka polarizacija ima pri različnih tarčah različno odbojnost. Žarek z vertikalno polarizacijo se močneje odbije od hrapave površine kot žarek s horizontalno polarizacijo (Gens, 1998). Polarizacija je torej lastnost senzorja, podobe SAR pa glede na polarizacijo omogočajo različno uporabo. Lastnosti različnih polarizacij koristi široko področje tehnologije SAR, tehnika PolSAR.

## 2.2 SAR interferometrija

### 2.2.1 Osnove radarske interferometrije

InSAR je tehnika za pridobivanje informacij o trirazsežnih objektih iz kompleksnega radarskega signala. Za razliko od tehnike PolSAR, kjer uporabljamo predvsem podatek o amplitudi, je za interferometrijo glavni uporabni podatek faza prejetega EMV. Osnovni izdelek interferometrije je interferogram, ki ga z nadaljnjo obdelavo lahko uporabimo na različne načine.

InSAR ima dva prevladujoča načina uporabe. Prvi je izdelava digitalnega modela površja (DMP), drugi pa je spremljanje gibanja površja Zemlje, se pravi meritve premikov s tehniko diferencialne interferometrije (DInSAR). Za oba načina uporabe je potrebna analiza in interpretacija interferogramov, ki predstavljajo fazno razliko med dvema podobama SAR istega območja, pridobljenima iz različnih položajev satelitov ali ob različnih časih. Sprememba lokacije senzorja povzroči večjo občutljivost na topografijo (primerno za izdelavo DMP), dva različna časa snemanja pa povzročita občutljivost na premike (primerno za spremljanje premikov, se pravi DInSAR) (Zebker in sod., 1994).

V radarski interferometriji torej uporabljamo dve podobi SAR. Razdalja med dvema satelitoma, ki snemata isto območje in njune produkte interferometrično obdelujemo skupaj, se imenuje interferometrična osnovna razdalja, njena projekcija, ki je pravokotna na smer žarka pa je pravokotna osnovna razdalja. Sprememba lokacije senzorja pomeni daljšo osnovno interferometrično razdaljo. Daljša kot je razdalja med dvema lokacijama snemanja za posamičen interferogram, boljše rezultate bomo dobili v izdelavi DMP, vendar ima vsak sistem neko največjo dopustno vrednost osnovne interferometrične razdalje (Ferretti in sod., 2007).

Slika 10 prikazuje geometrijo satelitskega interferometričnega SAR z dvema prehodoma. S1 in S2 predstavljata položaj senzorja, B osnovno interferometrično razdaljo, Bn pravokotno osnovno interferometrično razdaljo, LOS pa smer gledanja satelita. Na podobi A sta prikazani ločljivost rastrske celice v poševni razdalji in razdalji na površju  $\delta r/\text{LOS}$  in razdalji na površju  $\delta y$ , na podobi B pa fazna razlika med dvema žarkoma (Rott, 2009).

Interferogram je podoba, ki vsebuje podatek o faznih razlikah med dvema podobama SAR. Izračunamo ga tako, da prvo kompleksno podobo SAR pomnožimo s konjugirano drugo kompleksno podobo SAR. Pogoji za izdelavo interferograma je uspešna koregistracija dveh kompleksnih podob

SAR, pridobljenih z bližnjih lokacij radarskih anten. (Rosen in sod., 2000). Postopek koregistracije z natančnim prekrivanjem dveh podob SAR zagotovi, da bodo isti objekti na površju Zemlje prispevali svojo vrednost faze v isto rastrsko celico na obeh podobah. Interferogram – fazno razliko – računamo z enačbo (Rott, 2009):

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1),$$

kjer je:

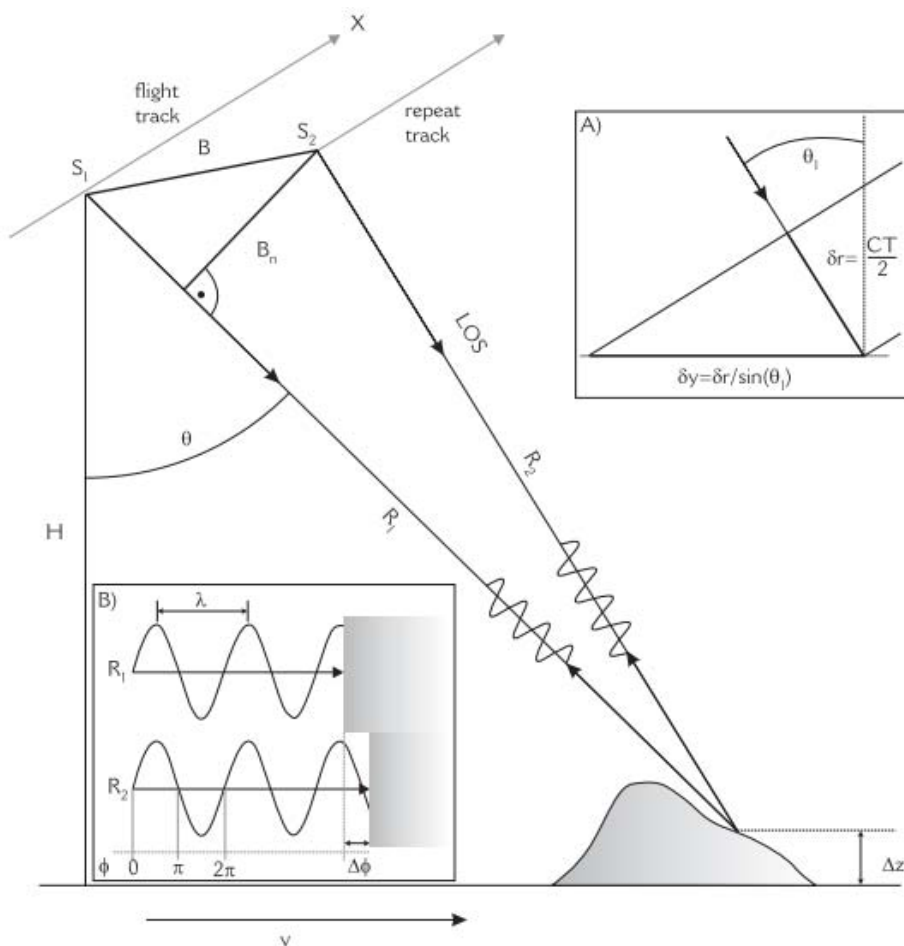
$\Delta\phi$ ..... fazna razlika,

$\phi_2$ ..... faza 2. podobe SAR,

$\phi_1$ ..... faza 1. podobe SAR,

$R_2$ ..... razdalja senzor-odbojnik 2. podobe SAR v obe smeri,

$R_1$ ..... razdalja senzor-odbojnik 1. podobe SAR v obe smeri.



Slika 10: Geometrija SAR interferometrije (Rott, 2009).

Fazna razlika je zaradi nedoločenosti s korakom  $2\pi$  označena z barvnimi kolobarji. Kadar govorimo o fazi interferograma, je govora pravzaprav o fazni razliki. Le-ta je sestavljena iz več komponent, kar prikazuje enačba (Rott, 2009):

$$\Delta\phi = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{dis}} + \phi_{\text{atm}},$$

kjer je:

$\phi_{\text{flat}}$ ..... faza interferograma z odstranjeno fazo ravnega terena,

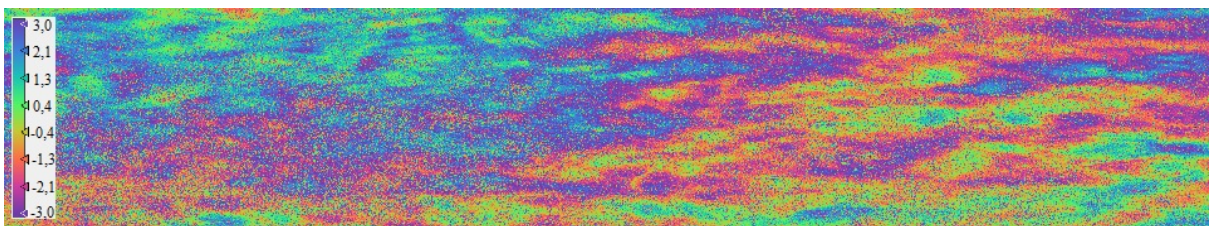
$\phi_{\text{topo}}$ .....komponenta topografije,

$\phi_{\text{dis}}$ ..... komponenta premika terena,

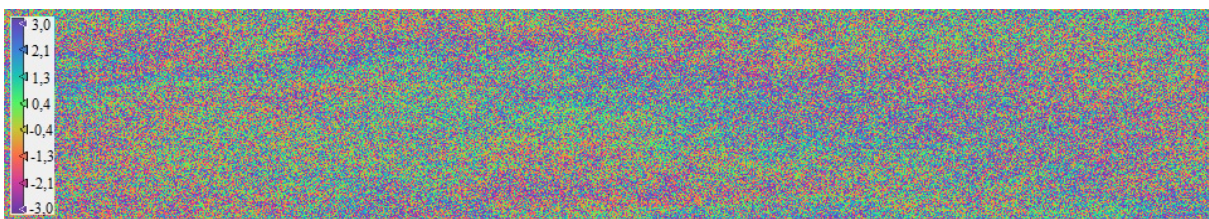
$\phi_{\text{atm}}$ ..... komponenta vpliva atmosfere.

Glede na naš cilj želimo eliminirati ostale vplive na fazo, da nam na koncu preostane le še  $\phi_{\text{topo}}$ , če je naš cilj izdelava DMP, oziroma  $\phi_{\text{dis}}$ , če je naš cilj diferencialni interferogram.  $\phi_{\text{topo}}$  zmanjšamo s čim manjšo osnovno razdaljo med dvema posnetkoma in ga je mogoče oceniti z uporabo DMP (Gens, 1998) oziroma z uporabo treh preletov.  $\phi_{\text{atm}}$  je mogoče eliminirati z uporabo tehnike PSI (Wang in sod., 2002) ali zlaganjem interferogramov (Strozzi in sod. 2003).  $\phi_{\text{dis}}$  je predmet zanimanja diferencialne interferometrije. Prisoten je, kadar je v času med preletoma prišlo do premika (potresa, taljenja ledu, plaza, posedanja in podobno). Z večanjem osnovne razdalje se izgublja občutljivost na premike.

Zaradi naštetih vplivov na vrednost fazne razlike se lahko podobe faznih razlik med seboj zelo razlikujejo. Na sliki 11 prikazujemo primer podobe fazne razlike na območju puščave v Egiptu, jugovzhodno od Kaira, kjer je koherenca odlična. Gre za območje približno 30x20 km. Jasno se prepozna vzorce, ki spominjajo na obliko terena, kateremu pripadajo. Za primerjavo podajamo fazno razliko območja Štajerske na sliki 12. Obe sliki predstavljata fazno razliko v razponu od  $-\pi$  do  $\pi$  takoj po izračunu intreferograma brez nadaljnje obdelave in zavzemata približno enako veliko območje. Vidimo, da lahko pri podobah faznih razlik pričakujemo zelo velike razlike. Glavni vpliv na jasnost podobe faznih razlik ima koherenca. Ta bistvena lastnost interferograma je predstavljena v poglavju 2.2.2. V obeh podobah je prisotna razvlečenost podobe v smeri razdalje na površju. Razlog za to popačenje je razlika v dimenzijah rastrske celice oziroma v dimenzijah njene projekcije na površje Zemlje. To neusklajenost z dejanskimi razdaljami na površju Zemlje odstranimo s kasnejšimi postopki popravkov terena.



Slika 11: Faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015.



Slika 12: Faza delnega območja Štajerske za interferometrični par 15. 10. 2014 - 27. 10. 2014.

Za pridobitev uporabnih rezultatov je potrebna nadaljnja obdelava interferograma. Največji izziv predstavlja razvijanje faze – odpravljanje fazne nedoločenosti. Ta postopek je ključen za nadgradnjo interferograma v geofizikalni izdelek (Gens, 2003). Razvijanje faze je podrobneje predstavljeno v poglavju 2.2.3.

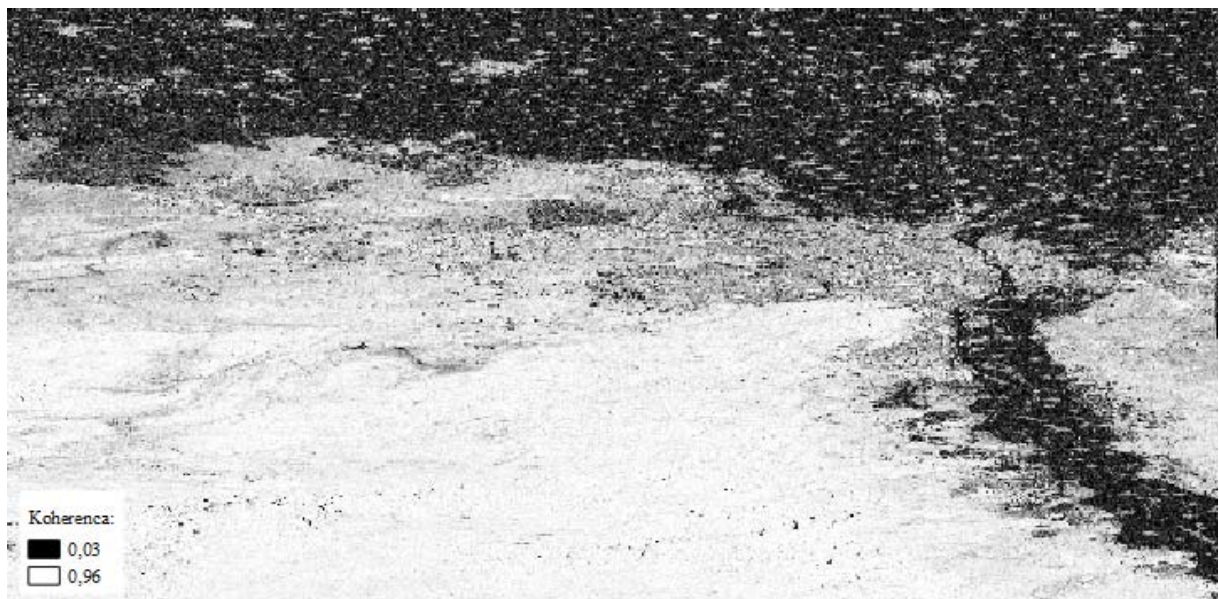
### 2.2.2 Koherenca interferograma

Koherenca je vrednost, ki opisuje korelacijo med imaginarnim in realnim delom signalov dveh preletov, podob SAR, ki sta združeni v interferometrični par, oziroma interferogram. Vrednost koherence je med 0 in 1, kjer 0 pomeni, da korelacije med dvema podobama SAR ni, 1 pa, da je korelacija popolna. Podatek o koherenci se uporablja kot mera za kakovost podobe SAR, ker bistveno vpliva na točnost izračuna faznih razlik in višin (Gens, 1998).

Na vrednost koherence vplivajo naslednji dejavniki (Schwäbisch in sod., 1995):

- termični šum,
- napake v fazi zaradi procesiranja,
- rahla razlika v položaju satelitov ob dveh preletih,
- sprememba faze zaradi spremembe objekta na površju Zemlje v času med dvema preletoma,
- različni atmosferski pogoji med dvema preletoma.

Ti dejavniki lahko privedejo do popolne izgube koherence takrat, ko je sprememba faze iz naštetih razlogov večja od valovne dolžine sistema. Lastnosti sistema vplivajo na vrednost koherence: za radarske sisteme, ki uporabljajo pas C je denimo znano, da so območja z gosto vegetacijo podvržena slabi koherenci. Tudi vodne površine imajo praviloma nizko koherenco. Urbane, skalnate in nasploh površine brez vegetacije pa imajo praviloma visoko vrednost koherence.



Slika 13: Koherenca za interferometrični par Egipta 17. 8. 2015 – 29. 8. 2015.

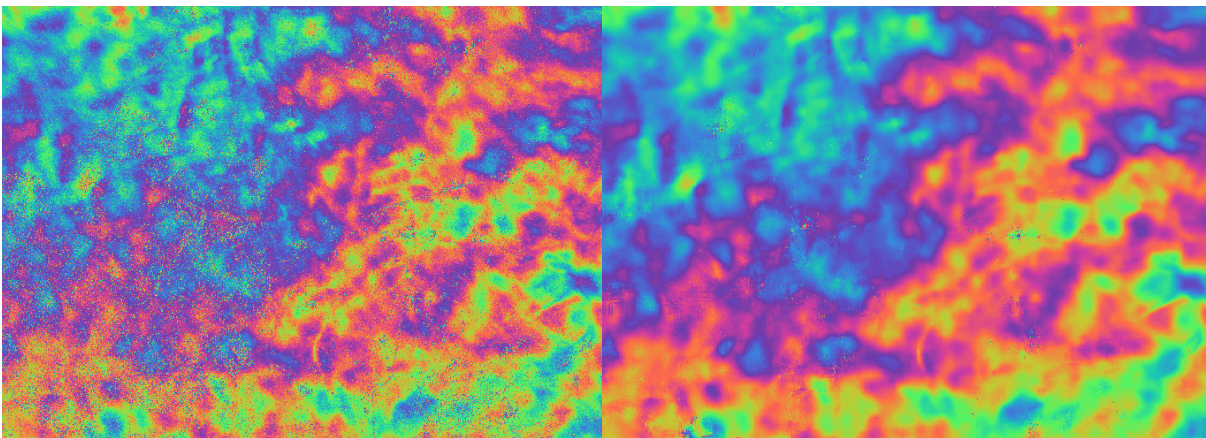
Na sliki 13 prikazujemo primer raznolike koherence. Gre za območje delte reke Nil in Kaira. Morske površine z nizko koherenco so prikazane s črno barvo. Na območju delte Nila je veliko poljedelstva, tam je koherenca sicer boljša od morske, a je vseeno nizka in zato v sivih odtenkih. Preostali del območja, kjer je puščava in urbane površine pa je obarvan z belo barvo, saj je tam vrednost koherence najvišja. Posnetka, iz katerih je bil narejen interferogram in izračun koherence, sta iz avgusta, ko v Egiptu ni padavin in ne vetra.

Sprememba faze v času med dvema preletoma lahko pomeni različne pojave, kot so denimo posedanje, potres ali plaz. Pomembno pa se je zavedati, da se drevje že ob močnejšem vetru, deževju ali v obdobju ozelenitve ali odpadanja listja v času med dvema preletoma lahko toliko spremeni, da se koherenca popolnoma izgubi. Praviloma velja, da krajši kot je čas med preletoma, boljša je koherenca.

### 2.2.3 Razvijanje faze

Ob snemanju se ne zabeleži absolutna faza, ampak samo v razponu med 0 in  $2\pi$  (neceli del faze). Fazna razlika v interferogramu zavzame vrednosti med  $-\pi$  in  $\pi$ . Razvijanje faze je postopek odpravljanja fazne nedoločenosti, pri katerem se vrednosti faze pripiše cel večkratnik  $2\pi$  in se tako sešteje razlike med kolobarji ter določi absolutno vrednost fazne razlike. Načinov razvijanja faze je več in zaenkrat noben ne velja za najbolj učinkovitega. Pregled metod in glavnih smernic napredka v razvijanju faze je zapisal Gens (2003). Program Snaphu, ki smo ga za razvijanje faze uporabili mi, temelji na modelu razvijanja faze, ki sta ga osnovala Chen in Zebker (2000, 2001, 2002).

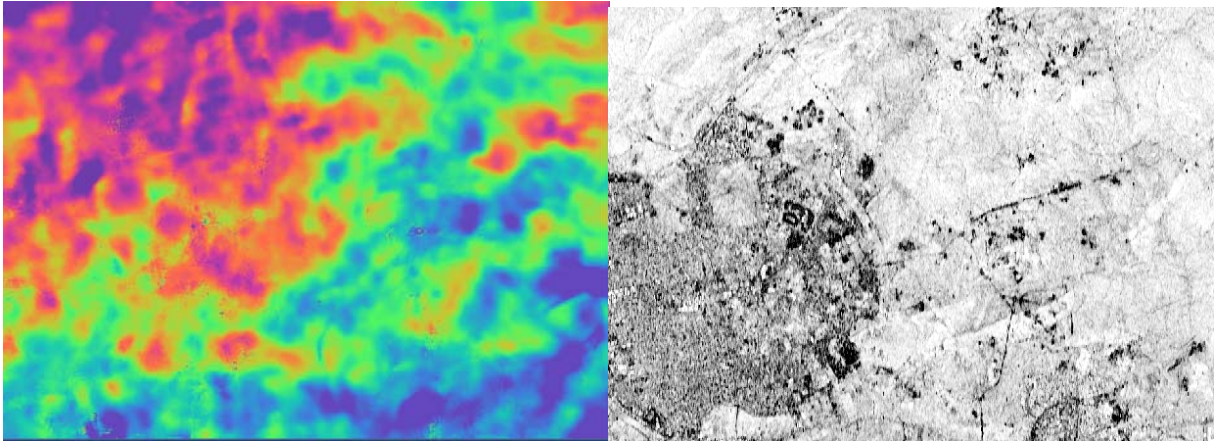
Pred razvijanjem faze je priporočljivo uporabiti večkratne poglede (angl. multilook) in opraviti filtriranje faze. Z večkratnimi pogledi zmanjšamo pojav zrnatosti. V interferometriji pri uporabi večkratnih pogledov uporabimo podatke le enega interferograma, kjer gre za povprečenje vrednosti sosednjih pikslov. Za ceno prostorske raznolikosti vrednosti faze pridobimo na točnosti faze (Ferretti in sod., 2007). Filtriranje faze je postopek, ki močno zmanjša odstopanja v kasnejšem razvijanju faze.



Slika 14: Faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015 po uporabi večkratnih pogledov – levo, ki jim je sledila uporaba filtriranja – desno.

Na sliki 14 prikazujemo fazo za isto območje kot na sliki 11 po uporabi večkratnih pogledov in filtriranju z Golsteinovim filtriranjem faze. Šum v podobi faze se je občutno zmanjšal. Opazimo tudi,

da se je, kot posledica večkratnih pogledov, izboljšala geometrija podobe in da so razdalje zdaj v pravem razmerju. Isto območje je prikazano na sliki 15, prikazana je razvita faza in koherenca. Gre za »šolski primer«, saj je srednja vrednost koherence na tem območju zelo visoka (0,77) in je zato razvijanje faze vsaj na prvi pogled bolj uspešno, saj vrednosti razvite faze zvezno prehajajo.



Slika 15: Razvita faza puščave jugovzhodno od Kaira za interferometrični par 29. 8. 2015 - 17. 8. 2015 – levo in koherenca istega območja – desno.

Na območju z visoko koherenco je razvijanje faze torej vsaj navidezno uspešno. Kot je mogoče razbrati iz rezultatov te naloge, je tako dobro razvijanje lahko prej izjema kot pravilo. Poleg koherence je problematičen tudi sam postopek razvijanja faze, ki še ne zagotavlja nujno dobrih rezultatov.

## 2.3 Diferencialna interferometrija

### 2.3.1 Osnove diferencialne interferometrije

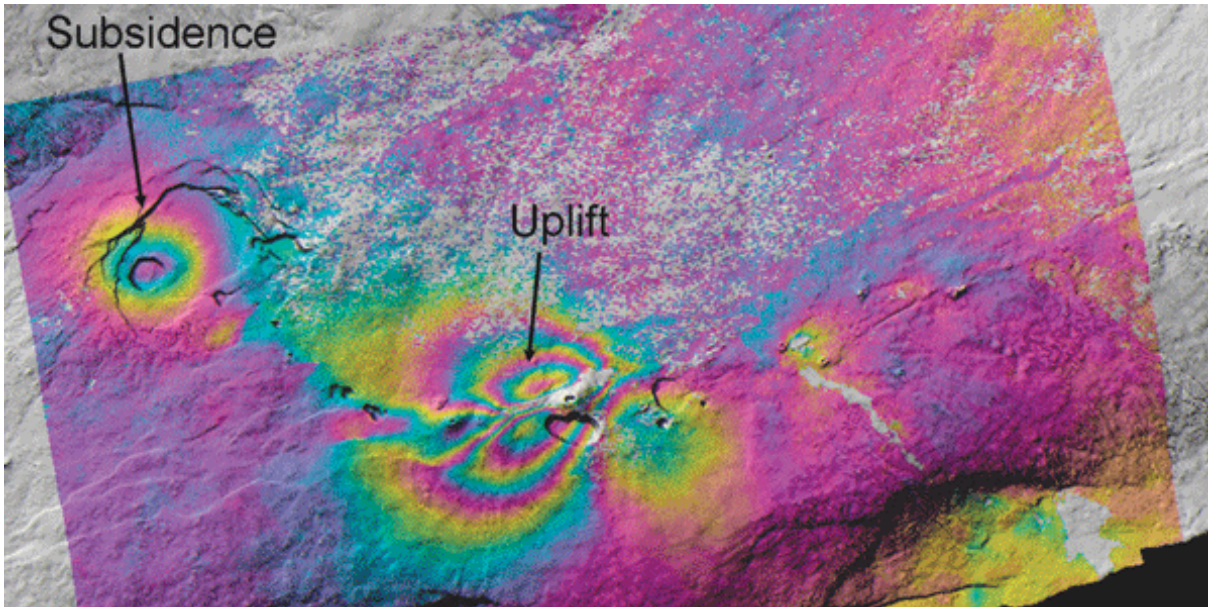
Tehnika DInSAR omogoča relativne meritve premikov. Te se odčita iz diferencialnega interferograma, glavnega izdelka diferencialne interferometrije. Zaradi geometrije je mogoče izmeriti le premike v smeri gledanja satelita (Gens, 1998). Kadar vemo, da so premiki prisotni zgolj v vertikalni smeri, lahko predvidevamo, da jih kot take ovrednoti že diferencialni interferogram. V primeru območja, kjer so premiki v vseh smereh, ne le vertikalni, ali pa če bi želeli pridobiti natančnejšo informacijo o premiku, je potrebno uporabiti spuščajočo in dvigajočo tirnico (Zebker in sod., 1994).

Tehnika DInSAR je namenjena merjenju deformacij terena, a v nasprotju s klasično geodetsko izmero spremlja premike celotnih območij zvezno in ne le v posamičnih točkah. Primerna je zgolj za merjenje premikov, manjših od valovne dolžine sistema. Razlika v premiku sosednjih rastrskih celic ne sme biti prevelika, saj se v tem primeru izgubi koherenca in merjenje premikov ni mogoče.

Primer diferencialnega interferograma prikazujemo na sliki 16. Vsak barvni kolobar (denimo od rumene do rumene) predstavlja premik v smeri gledanja radarja v velikosti polovice valovne dolžine sistema.



V diferencialnem interferogramu lahko prepoznamo tako dviganje kot posedanje terena in sicer po pozitivnih ali negativnih vrednostih premika.



Slika 16: Posedanje in dviganje terena kot posledica potresa. Območje zgoščenih kolobarjev pomeni premik, barvno homogena območja pa predstavljajo relativno mirujoča območja (ASF, 2016).

S tehniko DInSAR je v teoriji mogoče spremljati deformacije zemeljskega površja z milimetrsko natančnostjo (Prati in sod., 1992). Omejitve tehnike predstavljajo predvsem časovna dekorelacija, geometrična dekorelacija in atmosferski vpliv na vrednost faze. Kot posledice časovne dekorelacije so območja z gosto vegetacijo in območja, kjer se odbojniki znotraj rastrske celice premikajo ali pa se spremenijo njihove odbojne lastnosti, neustrezna za določanje premikov. Geometrična dekorelacija omejuje število parov preletov, primernih za interferometrično obdelavo (Zebker in sod, 1992). Atmosferski vpliv predvsem z neenakomerno razporeditvijo vlažnosti v troposferi močno poslabša kakovost diferencialnega interferograma, iz vrednosti koherence pa se ga ne da zaznati in oceniti (Ferretti in sod., 1999).

Diferencialno interferometrijo nadgrajuje metoda PSI. Premike spremlja na odbojnikih z visoko koherenco, ki jih je mogoče na vseh podobah jasno določiti in skozi čas ohranjajo svoje lastnosti. Metoda je posebej uporabna, ker omogoča oceno in eliminacijo vpliva atmosfere na vrednost faze (Ferretti in sod., 2001). DInSAR daje ploskovne rezultate, PSI pa točkovne. PSI omogoča daljše časovno opazovanje, kar je koristno še posebej v primerih območij z gosto vegetacijo, kjer DInSAR odpove (Oštir in sod., 2007). Metodi PSI in drugim metodam, ki omogočajo skoraj popolno eliminacijo vpliva atmosfere na fazo, je in bo v prihodnosti posvečena velika pozornost (Rucci in sod., 2012). V nalogi metode PSI nismo preizkusili, ker nismo imeli na razpolago ustrezne programske opreme.

### 2.3.2 Izdelava diferencialnega interferograma

Poznamo štiri osnovne načine izdelave diferencialnega interferograma (Ferretti in sod., 2007):

1. Uporaba enega interferometričnega para z blizu-nično interferometrično osnovno pravokotno razdaljo: na interferometrično fazo vpliva le premik, brez vpliva topografije, zato druga obdelava ni potrebna.
2. Uporaba enega interferometričnega para z interferometrično osnovno pravokotno razdaljo, ki ni nič in uporabo DMP.
3. Uporaba podatkov treh preletov iz katerih izdelamo dva interferograma: en podoba je v procesu koregistracije nadrejena (skupna) in se na njo koregistrira dve podrejeni podobi. Premik se zgodi pri enem od interferogramov, pri drugem pa ne.
4. Način enak tretjemu, le da dvema nadrejenima podobama registriramo po eno različno podrejeno.

V prvem primeru je glavni pogoj blizu nična osnovna pravokotna razdalja, kar je redko primer. V drugem primeru je pogoj uporaba DMP, ki ima boljšo natančnost od natančnosti zelenih rezultatov. Tudi to je v diferencialni interferometriji, kadar iščemo premike reda velikosti nekaj centimetrov ali milimetrov, redkost. Tretji način je za podatke Sentinel-1 najbolj primeren in smo ga uporabili v nalogi.

Kadar je govora o tehniki DInSAR z uporabo treh preletov, je običajno postopek sledeč: dva preleta, med katerima se premik ni zgodil, uporabimo za tvorjenje interferograma, ki nosi informacijo o terenu, se pravi za tvorjenje DMP. Dva preleta, med katerima se je zgodil premik, uporabimo za tvorjenje deformacijskega interferograma, ki nosi informacijo o terenu in premiku. Oba interferometrična para morata imeti skupno nadrejeno podobo. Od deformacijskega interferograma odštejemo ustvarjen DMP in kot rezultat dobimo diferencialni interferogram.

V naši nalogi smo izdelavo diferencialnega interferograma opravili po metodi Zebkerja in sod. (1994). Za metodo je značilno, da lahko z upoštevanjem razmerja med pravokotnima osnovnima razdaljama obeh interferogramov izračuna diferencialni interferogram brez da bi za to potrebovali točno vrednost kota gledanja za vsako točko ali informacijo o površju Zemlje – DMP. Izračun diferencialnega interferograma poteka po enačbi:

$$\phi' - \frac{Bp'}{Bp} \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho,$$

kjer je:

$\phi$ ..... razvita faza prvega interferograma,

$\phi'$ .....razvita faza drugega interferograma,

$Bp$ .....pravokotna osnovna razdalja prvega interferograma,

$Bp'$ .....pravokotna osnovna razdalja drugega interferograma,

$\lambda$ .....valovna dolžina sistema,

$\Delta\rho$ .....premik v smeri gledanja satelita.

### 2.3.3 Sorodni primeri uporabe diferencialne interferometrije

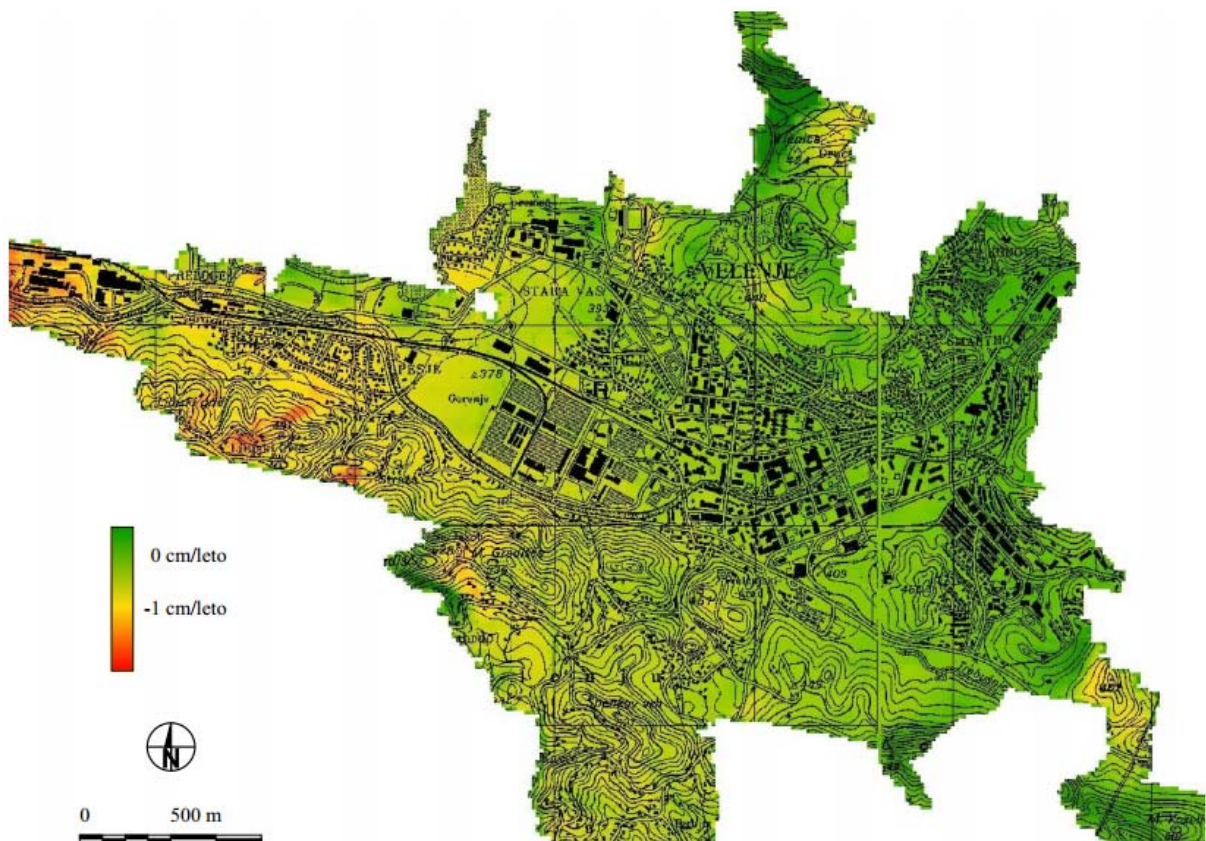
Za našo nalogo so pomembne izkušnje drugih avtorjev, ki so se ukvarjali s tehniko DInSAR. V tem poglavju povzemamo bistvene ugotovitve opravljenega pregleda literature. Še posebej so nas zanimali

primeri, ko je šlo za podobne okoliščine kot pri naši nalogi in sicer to pomeni uporabo podatkov treh preletov, spremljanja poseданj in testna območja, ki so poraščena z gosto vegetacijo. Kjer ni posebej poudarjeno, so bili v raziskavah vedno uporabljeni podatki satelitov, ki uporabljajo pas C (predvsem satelita ERS-1 in ERS-2), kar je tudi ključna lastnost naše naloge.

Walter in sod. (2009) so primerjali uporabnost podatkov različnih satelitov, ki uporabljajo pas C, X in L, za spremljanje poseданja nad podzemnim rudnikom. S procesiranjem podatkov pasu C niso dobili ustreznih rezultatov, s katerimi bi lahko ocenili deformacijo terena na območju vegetacije. Tudi drugi avtorji (Oštir in sod., 2007; Eineder in sod., 1999) navajajo, da na gosto poraščenih območjih, kakršen je večji del Slovenije, kadar imamo na voljo le podatke pasu C, ni mogoče ugotavljati premikov s tehniko DInSAR. Za območja z gosto vegetacijo je primernejši pas L, ki se prebije skozi vegetacijo do tal (Reigber in sod., 2003).

Raziskava Mora in sod. (2001) je v več vidikih podobna naši. S tehniko DInSAR so spremljali poseданje majhnega mesta, obdanega z gozdom. Za primerjavo so uporabili podatke GNSS meritev, vzporedno pa so premike spremljali tudi z metodo PSI. Največje poseданje, izmerjeno z metodami klasične geodezije je bilo 2 cm. DInSAR se je izkazal za uporabnega izključno na urbanih površinah, medtem, ko je na območjih z vegetacijo prišla v poštev metoda PSI.

Oštir (2000) je v svoji doktorski disertaciji med drugim s tehniko DInSAR spremljal poseданje Velenja. Na sliki 17 je prikazano koherentno uteženo povprečje navpičnih premikov okolice rudnika Velenje glede na podatke iz let 1995 do 1999. Rezultati, ki jih je dobil, so v redu velikosti dejanskih premikov. Iz modela se da razbrati, da so poseданja v bližini premogovnika na skrajnem zahodnem delu slike večja kot drugod, kar je tudi pričakovati.



Slika 17: Model letnih premikov na območju Velenja (Oštir, 2000).

Več avtorjev ob uporabi tehnike DInSAR navaja atmosferski vpliv na vrednost faze kot glavni vzrok za netočnost rezultatov (Strozzi in sod., 1999) oziroma se ukvarja z možnostmi eliminacije atmosferskega vpliva (Zebker, 1997). Velik vpliv na vrednost faze ima še posebej vlažnost zraka (Pierdicca in sod., 2009).

Ob pregledu literature ugotavljamo naslednje:

- kot problematična se kaže gosta vegetacija in posledično slaba koherenca, ki povzroča nezanesljivo razvijanje faze, kar ima znatne posledice na uspehu in kakovosti na več točkah obdelave,
- pas C je zaradi lastnosti, da se ne prebije do tal skozi vegetacijo, manj primeren za spremljanje premikov na poraščenih območjih,
- v rezultatih DInSAR je prisoten velik vpliv atmosfere na vrednost faze,
- kot realen cilj raziskave lahko pričakujemo posedanja reda velikosti GNSS meritev.

Zaradi ugotovljenega ob pregledu literature smo že na začetku naloge pričakovali težave. Odločili smo se, da bomo pri preizkušnju uporabe tehnike DInSAR na območju Velenja, v primeru, da na širšem območju ne bomo uspeli zaradi slabe koherence, osredotočili predvsem na urbana območja, saj se tam obetajo najboljši rezultati.

## 2.4 Sentinel-1

Podatki SAR, uporabljeni v tej nalogi, so pridobljeni s Sentinelom-1, zato smo mu posvetili posebno poglavje, ki poda glavne lastnosti konstelacije. Poglavje je povzeto po Esi (2016f).



Slika 18: Sentinel-1A (Esa, 2016f).

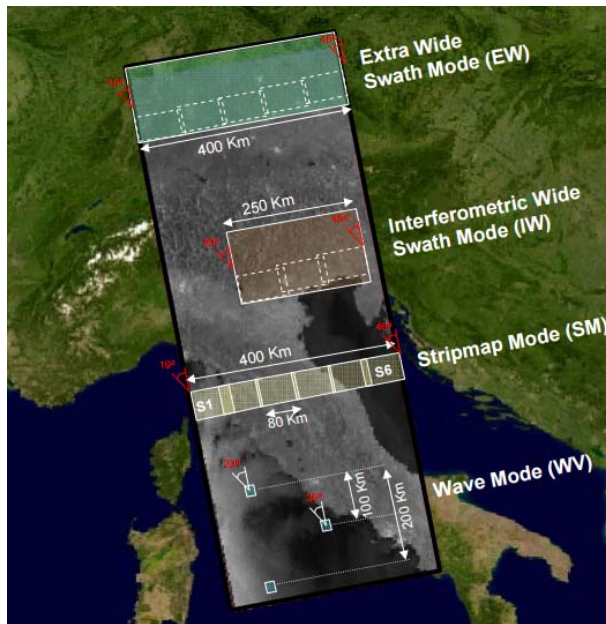
Sentinel-1 je konstelacija dveh satelitov: Sentinela-1A (slika 18), ki je bil izstreljen aprila 2014 in Sentinela-1B, katerega izstrelitev načrtujejo za leto 2016. Skozi nalogo uporabljamo predvsem izraz Sentinel-1, saj so v tem trenutku na voljo zgolj podatki enega Sentinela-1 in si bosta satelita, ko bosta oba obratovala, karseda podobna tako po tehničnih lastnostih kot po izdelkih. Njuno poslanstvo je spremljanje kopnega in oceanov s tehnologijo SAR.

Namen misije Sentinel-1 je:

- spremljanje gozdov, kopenskih voda, prsti in kmetijstva,
- podpora kartiranju v primeru naravnih katastrof,
- spremljanje morja in morskega okolja,
- spremljanje ledenih morij in ledenih gor,
- izdelava kart ledenega pokrova visoke ločljivosti,
- spremljanje pogojev na zaledenem morju,
- kartiranje naftnih madežev,
- zaznava morskih vozil,
- spremljanje klimatskih sprememb ...

Tirnica Sentinela-1A je sončno-sinhrona, skoraj polarna in skoraj krožna. Satelit leti na višini 693 km, isto mesto nad Zemljo pa obiše vsakih 12 dni in tako zagotovi redne podatke, ki jih je mogoče skozi čas primerjati in uporabljati na različne načine. Satelit načeloma leti v navideznem in stalnem tunelu s premerom 100 m. Sentinel-1B bo delovanje Sentinela-1A dopolnil tako, da bosta skupaj nudila obhodni čas 6 dni, kar je izjemno kratko obdobje. Skrajšanje obhodnega časa na 6 dni bo omogočilo nove razsežnosti uporabe SAR.

Na satelit nameščen senzor SAR uporablja pas C. Frekvenca valovanja za Sentinel-1A je 5,405 GHz, valovna dolžina pa 55,465 mm.



Slika 19: Načini senzorja Sentinel-1 (Esa, 2016f).

Sentinel-1 uporablja štiri načine senzorja, ki so prikazani na sliki 19:

- Stripmap (SM): 80 km širok snemalni pas, ločljivost 5x5 m,
- Interferometric wide swath (IW): 250 km širok snemalni pas, ločljivost 5x20 m,
- Extra wide swath (EW): 400 km širok snemalni pas, ločljivost 25x100 m,
- Wave (WV): posamične podobe dimenzij 20x20 km, 100 km ob tirnici, izmenjujoča se dva vpadna kota, ločljivost 5x20 m.

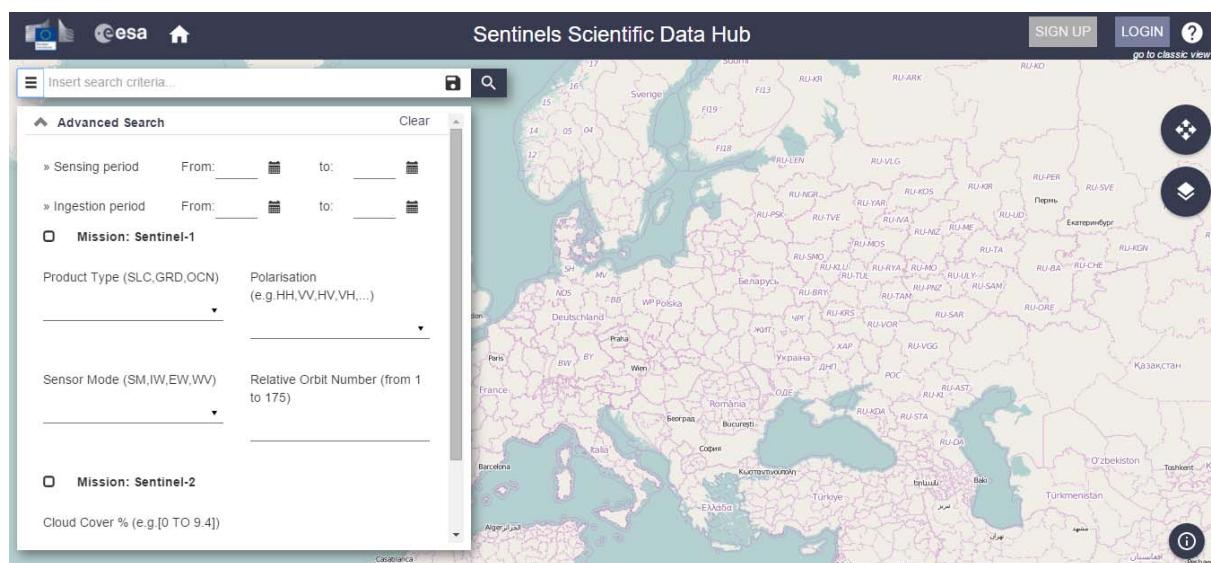
Sentinel-1 vedno oddaja EMV v eni polarizaciji, sprejema pa lahko hkrati eno ali dve različni polarizaciji. Za način senzorja WV so na voljo zgolj polarizacije HH ali VV, za načine SM, IW in EW pa so na voljo HH ali VV ali HH in HV ali VV in VH. Za snemanje kopnega je primaren način senzorja IW s polarizacijama VV in VH, za snemanje morja pa WV s polarizacijo VV. Način EW je namenjen nadzoru ladijskega prometa, razlivanja olja in spremljanja zaledenelega morja. SM način pa bo uporabljen zgolj na zahtevo ob izjemnih dogodkih, kot so naravne nesreče in podobno.

Za uporabo so na voljo različne stopnje obdelanosti podatkov in sicer nivo 0, nivo 1 in nivo 2. Za uporabo v interferometriji in mnogih drugih tehnikah, so najbolj primerni podatki nivoja 1: Slant-Range Single-Look Complex Products (SLC), ki se nahajajo v geometriji poševne razdalje, vsebujejo podatke enega preleta s podatkom o fazi in amplitudi.

### 3 VIRI PODATKOV

#### 3.1 Izbira podatkov in dostop do njih

Podatke satelitov Sentinel lahko pridobimo prek Esinega spletnega portala SSDH. Portal omogoča dostop do vseh obstoječih Sentinelovih podatkov, v tem trenutku Sentinel-1 in Sentinel-2. Na sliki 20 je prikazana vstopna stran SSDH in napredno iskanje, ki ga uporabljamo za lažje dostopanje do podatkov.



Slika 20: Iskalnik Sentinelovih podatkov SSDH.

Sprva na zemljevidu označimo območje, ki nas zanima, nato pa v podrobnem iskanju izberemo časovno obdobje preletov satelitov, tip produkta, polarizacijo, način senzorja in relativno številko tirnice. Za naš primer smo v iskanje vnesli tip produkta SLC, polarizacijo VV, nastavev senzorja IW in relativno številko tirnice 146. Iskalnik zadetke razvrsti od najnovejšega do najstarejšega, sledi izbira posnetka in prenos podatkov.

Relativno tirnico 146 smo uporabili, ker njeno območje prekriva velik del Slovenije in se naše testno območje nahaja na podatkih vseh preletov. Številko relativno tirnice si je dobro zapomniti, kadar nas zanimajo večkratni preleti istega območja za uporabo v diferencialni interferometriji. Z uporabo vedno iste relativne tirnice ohranjamo primerno osnovno razdaljo med dvema preletoma, katerih podatke skupaj interferometrično obdelujemo. V naši nalogi smo uporabljali območja tirnice 146, ki je dvigajoča. Zaradi nerazgibanosti terena glavnega območja našega interesa, urbanih območjih, bi lahko uporabili tudi spuščajočo tirnico in ne bi bilo bistvene razlike. Kadar pa je opazovano območje na vzpetinah, je potrebno izbrati takšno tirnico, ki bo s svojo geometrijo zmanjšala vpliv popačenj zaradi lastnosti terena.

V splošnem za tehniko DInSAR velja, da so pogostejše uporabljene polarizacije z enako polarizacijo pri sprejemu in oddaji EMV, se pravi VV ali HH.

Podatke pridobimo v stisnjeni verziji, ki je praktična zaradi zmanjšane količine podatkov. Za Esino programsko opremo, ki jo uporabljamo v nalogi – Snap in Sentinel-1Toolbox (S1TBX), ki je predhodnik Snapa, značilno, da odpira direktno stisnjeno verzijo podatkov. Če nimamo namena uporabljati kakšne druge programske opreme, ki stisnjene verzije ne podpira, se nam podatkov torej ne splača razširiti.

Ime datoteke SAR podatkov enega preleta, ki smo jo uspešno naložili, je zapisano v takšni obliki: S1A\_IW\_SLC\_\_1SDV\_20150817T155612\_20150817T155640\_007305\_00A055\_1526. V imenu datoteke najdemo informacije o preletu in snemanju, kot so senzor, način delovanja sensorja, tip produkta, datum in čas snemanja in podobno. Ob zaključku nalaganja podatkov je treba biti pozoren na velikost datoteke, saj med nalaganjem pogosto pride do napake in se le-to predčasno zaključi. Običajna velikost stisnjene datoteke za način sensorja IW in tip produkta SLC, je nekje med 4,5 in 5 GB.

### 3.2 Popolnost podatkov

Sentinel-1A se nad našim ozemljem znajde enkrat na 12 dni, kar teoretično zagotavlja visoko periodičnost in rednost podatkov. Na SSDH nekaterih posnetkov na datume, ko bi le-ti morali obstajati, vseeno ni na razpolago. Nadalje se območja podob SAR vsake nekaj mesecev spremenijo, kar oteži opazovanje pojavov na celotnem območju v daljšem časovnem obdobju. To težavo obidem, če za opazovanja izberemo manjša območja in pred izbiro območja temeljito pregledamo območja preletov, da bo izbrano testno območje zagotovo prisotno v vseh pridobljenih podobah SAR. Najbolje je uporabiti prelete, kjer se območje interesa nahaja na sredini podobe SAR. Obrobna območja so lahko problematična, ker območje preleta, označeno na SSDH ni nujno zanesljivo. V preglednici 2 prikazujemo stanje dostopnosti podatkov in spreminjanje območij za relativno tirnico 146, kjer se nahaja tudi naše testno območje Velenja in smo jo uporabili v nalogi. Kljub temu, da bi bilo najbolj uporabno, če bi se za isto tirnico stalno ohranjalo isto območje, vidimo, da temu še zdaleč ni tako. Sklepamo, da gre za začetne probleme in pričakujemo, da se bodo sčasoma območja za posamezno tirnico nehala spreminjati.

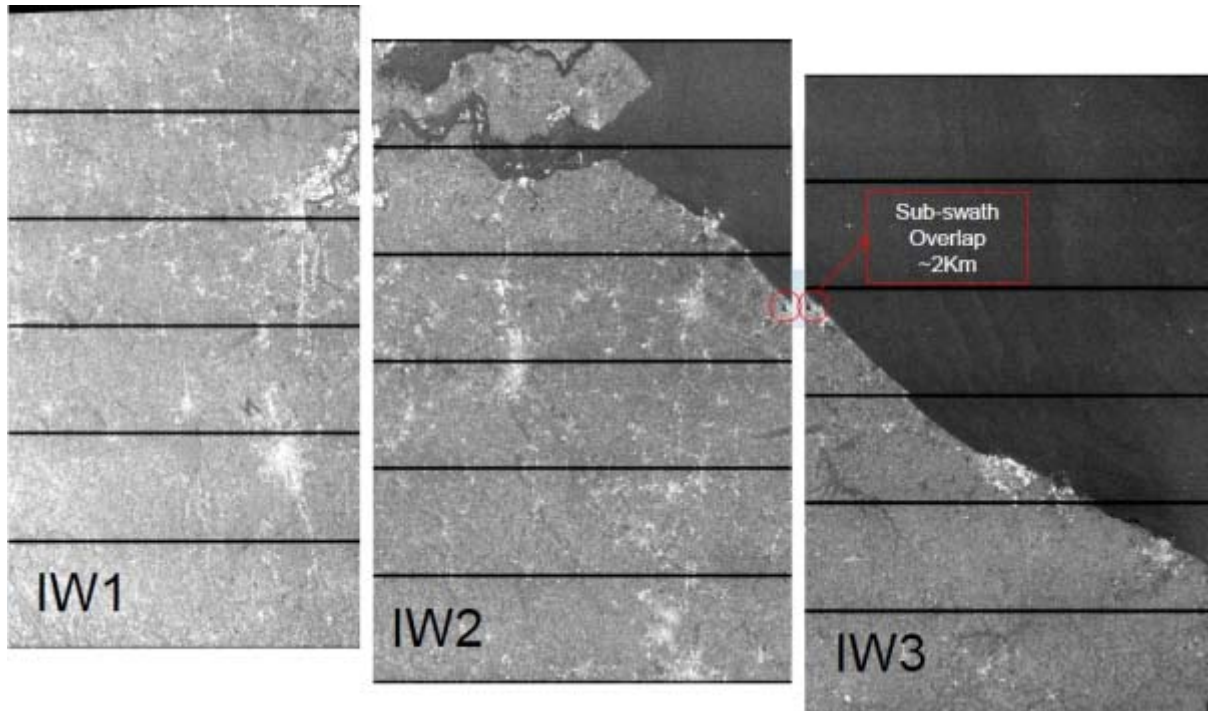
Razlog za tako pogosto spreminjanje območja podobe SAR glede na relativno tirnico nam je neznan. Satelit se sicer v vesolju lahko premakne iz predvidene tirnice zaradi delovanja »tretjih« teles, atmosferskega trenja, nesferičnosti Zemlje ali Sončevega sevanja, prav tako pa lahko te premike upravljavci satelita odpravijo z uporabo korekcijskih motorjev in koriščenjem zelo omejene količine goriva (Oštir, 2006). Sklepamo, da v tem primeru ne gre za to, saj širina snemalnega pasu v smeri razdalje na površju skozi celotno obdobje zbranih podatkov ostaja približno enaka in na istem mestu, spreminja se le razrez v smeri leta satelita.



Preglednica 2: Pregled dostopnosti in sprememb območja za tirnico 146.

Časovno obdobje	Dostopnost podatkov	Območje
15. 10. 2014 – 30. 7. 2015	Od 25 preletov so na voljo podatki za 21 podatkov. Na voljo: 15. 10. 2014, 27. 10. 2014, 8. 11. 2014, 2. 12. 2014, 14. 12. 2014, 26. 12. 2014, 7. 1. 2015, 19. 1. 2015, 31. 1. 2015, 24. 2. 2015, 8. 3. 2015, 20. 3. 2015, 1. 4. 2015, 13. 4. 2015, 25. 4. 2015, 19. 5. 2015, 31. 5. 2015, 12. 6. 2015, 6. 7. 2015, 18. 7. 2015, 30. 7. 2015. Manjkajo: 20. 11. 2014, 12. 2. 2015, 24. 6. 2015. Za 7. 5. 2015 so na voljo podatki z zamaknjениm območjem.	
31. 7. 2015 – 3. 11. 2015	Od 8 preletov so na voljo vsi podatki: 11. 8. 2015, 23. 8. 2015, 4. 9. 2015, 16. 9. 2015, 28. 9. 2015, 10. 10. 2015, 22. 10. 2015, 3. 11. 2015.	
4. 11. 2015 – 14. 1. 2016	Na voljo je vseh 6 posnetkov, a sta območji posnetkov dve in se izmenjujeta na vsakem preletu (15. 11. 2015, 9. 12. 2015, 2. 1. 2016 – zgornje območje z Ljubljano, 27. 11. 2015, 21. 12. 2015, 14. 1. 2016 – spodnje območje brez Ljubljane).	

Vsaka podoba SAR je razdeljena na 3 podpase (angl. subswath). Zaradi velike količine podatkov in lažje nadaljnje obdelave uporabljena programska oprema Snap predvideva, da bomo v postopku koregistracije izbrali le enega od teh treh podpasov, česar se je pametno zavedati tudi pri izbiri relativne tirnice. Princip razreza podobe SAR na podpase je prikazan na sliki 22.



Slika 21: Razrez podobe SAR na tri podpase (Esa, 2016g).

Ob obsežnem pregledu in obdelavi podatkov smo ugotovili, da se ne moremo z gotovostjo zanesti, da bo območje, na SSDH označeno kot območje podobe SAR, ki jo nameravamo naložiti, dejansko območje naložene podobe SAR. Na isti način se ni za zanašati na karto podob, ki jo prikazuje uporabljena programska oprema Snap, ki prav tako ne prikazuje nujno pravega območja podobe, temveč pogosto zamaknjeno. Če se želimo res prepričati, ali bomo našli iskano območje na določeni podobi SAR, moramo, sploh če se zeleno območje nahaja pri robu označenega območja, podobo naložiti in odpreti v izbrani programske opremi. S pomočjo prikaza koordinat na dnu velikega prikaznega okna, preverimo, če se naše območje res nahaja v podobi.

### 3.3 Podatki o rabi tal

Za izračun srednje vrednosti koherence za posamično rabo tal smo na spletni strani Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano pridobili sloj rabe tal (MKGP, 2016a). Sloj vsebuje poligone rabe tal, ki prekrivajo celotno območje Slovenije, v atributni tabeli pa je za vsak poligon zapisana številka rabe raba\_ID, ki poligone loči na rabe po uradnem šifrantu rabe tal (MKGP, 2016b).

### 3.4 Izbira testnega območja

Izbirno testnega območja smo opravili z razmislekom. Območje Velenja z okolico je moralo biti dovolj majhno, da je bil delež vegetacije čim nižji in smo s tem zagotovili večjo verjetnost za uspešno razvijanje faze. Po drugi strani pa je moralo biti območje dovolj veliko, da smo lahko opazovali premike na zelenem območju in da je bilo razvijanje faze sploh uspešno – če smo območje preveč zmanjšali (recimo na 1 km<sup>2</sup>), je bil rezultat razvijanja faze neuporaben. Ko smo si izbrali testno območje, smo izbrali še relativno tirnico, katere podatke smo uporabljali.

Diferencialni interferogram poda premike v smeri gledanja satelita. V tej nalogi smo predpostavili, da so premiki na območju Velenja predvsem vertikalni in je tako premik v smeri gledanja satelita dober približek vertikalnemu premiku. Le-tega smo primerjali s terenskimi meritvami.

### 3.5 Kontrolni podatki GNSS izmere

Za kontrolo rezultatov smo pridobili terenske meritve, ki jih za območje Velenja izvaja in hrani podjetje PV Invest. Gre za koordinate točk, ki jih enkrat letno v času poletja spremljajo z GNSS meritvami. Na sliki 23 prikazujemo lokacije vseh GNSS točk, za katere smo pridobili podatke.



Slika 22: Točke GNSS mreže v okolici Velenja (Vir podatkov: PV Invest, 2015).

V preglednicah 3 in 4 prikazujemo vertikalne premike za točke, ki smo jih izračunali iz rezultatov terenske izmere. Prikazujemo premike v času enega leta in premike, preračunane v čas 24 dni, kakršen je čas treh zaporednih preletov Sentinel-1, torej čas za katerega smo izdelali diferencialni interferogram. Pri računanju premikov v času 24 dni smo predpostavili, da so le-ti linearni, se pravi enakomerni skozi celo leto. Bolj se realnosti ne moremo približati, ker so terenske meritve opravljene zgolj enkrat letno.

Poleg meritev na predstavljenih GNSS točkah, se meritve na območju Velenja izvajajo še na mnogih drugih točkah, za katere pa v času izdelovanja te naloge še ni bilo na voljo rezultatov zadnjih meritev, ki bi jih lahko primerjali s premiki v diferencialnem interferogramu.

Preglednica 3: Vertikalni premiki točk GNSS mreže – 1. del.

	11A	12A	2Š3A	367A	JEZ	13A	GA	NOP
Vertikalni premik / leto [mm]	-1	-3	-4	-3	0	-14	-2	-17
Vertikalni premik / 24 dni [mm]	-0,07	-0,20	-0,26	-0,20	0,00	-0,92	-0,13	-1,12

Preglednica 4: Vertikalni premiki točk GNSS mreže – 2. del.

	UZ	N6A	26Z	Š5A	ŠA	ŠB	ŠD	ŠE	K8A
Vertikalni premik / leto [mm]	-4	-6	-1	5	-1	-1	-3	-1	0
Vertikalni premik / 24 dni [mm]	-0,26	-0,39	-0,07	0,33	-0,07	-0,07	-0,20	-0,07	0,00

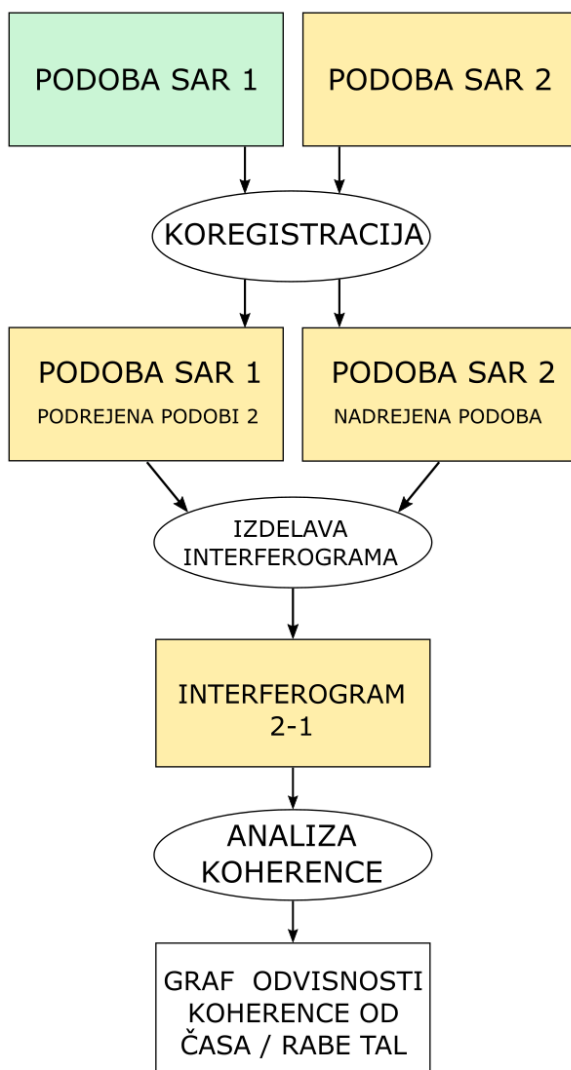
V preglednicah 3 in 4 smo navedli premike vseh GNSS točk, ki so na voljo. Izmed vseh 17 točk se le ena dviga (Š5A), dve se ne premikata (JEZ, K8A), ostale pa se spuščajo. Premiki točk GNSS mreže potrjujejo lastnost rudniških območij, da se posedajo. Ti premiki so v nadaljevanju naloge služili za oceno uspešnosti izdelave diferencialnega interferograma.

## 4 METODOLOGIJA OBDELAVE PODATKOV

Ker je naloga sestavljena iz dveh delov, tudi metodologijo predstavljamo v dveh poglavjih. Obdelava podatkov je bila izvedena v programih Sentinel-1 Toolbox, Snap, Snaphu, QGIS in Microsoft Excel. Postopek obdelave podatkov smo vodeno po korakih zapisali v prilogi A. Ker uspešna obdelava podatkov za začetnika ni samoumevna, prav tako pa zaradi dejstva, da je programska oprema, v kateri smo opravili velik del naloge, nova, v razvoju in ima še nekaj napak in pomanjkljivosti, smo v prilogi B zapisali še komentar na programsko opremo.

### 4.1 Metodologija analize koherence glede na čas v letu in rabo tal

Metodologija, uporabljena za analizo koherence, je razvidna iz slike 24.



Slika 23: Metodologija prvega dela naloge: analize koherence glede na čas v letu in rabo tal.

Podoba SAR 1 in podoba SAR 2 predstavljata podatke dveh zaporednih snemanj (preletov), podoba 1 podatke pridobljene s prvim preletom, podoba 2 pa podatke, pridobljene 12 dni kasneje, ob drugem preletu.

Najprej je bilo potrebno podobi koregistrirati. Ker je bil naš cilj pri tem delu naloge izdelati več samostojnih interferogramov in zgolj analiza njihove koherence, ni pomembno, katero podobo smo izbrali za nadrejeno in katero za podrejeno. Koregistracijo smo izvedli v več korakih. Najprej smo izvedli razrez na podpasove in polarizacijo, glede na to, kje se nahaja naše testno območje in katera polarizacija nas zanima. Nato smo s pomočjo programske opreme samodejno pridobili podatke o preciznih tirnicah za vsako podobo in jih vključili v postopek obdelave. Podatki preciznih tirnic zagotavljajo točen položaj satelita in njegovo hitrost. Z njihovo uporabo so bili vsi naslednji koraki izvedeni z boljšo natančnostjo. Precizne tirnice zagotavlja Esa na temu namenjenem spletnem portalu (2016g). Dve podobi SAR istega podpasu, polarizacije in z uporabo preciznih tirnic smo nato koregistrirali.

Sledil je izračun interferograma, katerega produkta sta faza (fazna razlika) in koherenca. Podoba SAR uporabljenega podpasu je bila do tega trenutka razdeljena na več delov, manjših pasov, ki smo jih na tej točki združili, da je mogoča enotna obdelava interferograma.

Pred naslednjimi koraki smo interferogram obrezali na želeno območje. Na ta način smo zmanjšali količino podatkov in posledično tudi čas obdelave, prav tako pa smo pridobili na jasnosti prikaza.

S statistično obdelavo smo najprej pridobili srednjo vrednost koherence za celotno izbrano območje, nato pa smo se posvetili še koherenci glede na rabo tal v obliki vektorskega sloja. Za uspešen izračun srednje vrednosti koherence za določeno rabo tal je bilo najprej potrebno združiti vse poligone posamične rabe v en poligon z več deli in šele nato izračunati srednjo vrednost rastra koherence pod tem poligonom. S tem smo postopek za posamičen interferometričen par zaključili.

Postopek smo ponovili za vse zaporedne pare, ki so v obdobju 15. 10. 2014 – 3. 11. 2015 na voljo, kar pomeni 29 zaporednih parov. Za analizo vrednosti koherence med interferogrami je pomembno, da smo uporabili vse podatke, ki so na voljo, prav tako pa je bilo pomembno ohraniti isti čas preleta med njimi, se pravi, kadar podatkov za posamičen prelet ni na voljo, za izdelavo interferograma nismo vzeli naslednjih razpoložljivih podatkov s časovnim razmikom 24 dni, temveč smo to obdobje izpustili in uporabili podatke naslednjih dveh preletov z razmikom 12 dni. Le tako so vrednosti koherence med seboj primerljive. Vse zbrane podatke smo oblikovali v graf, iz katerega je razvidno obnašanje koherence skozi leto.

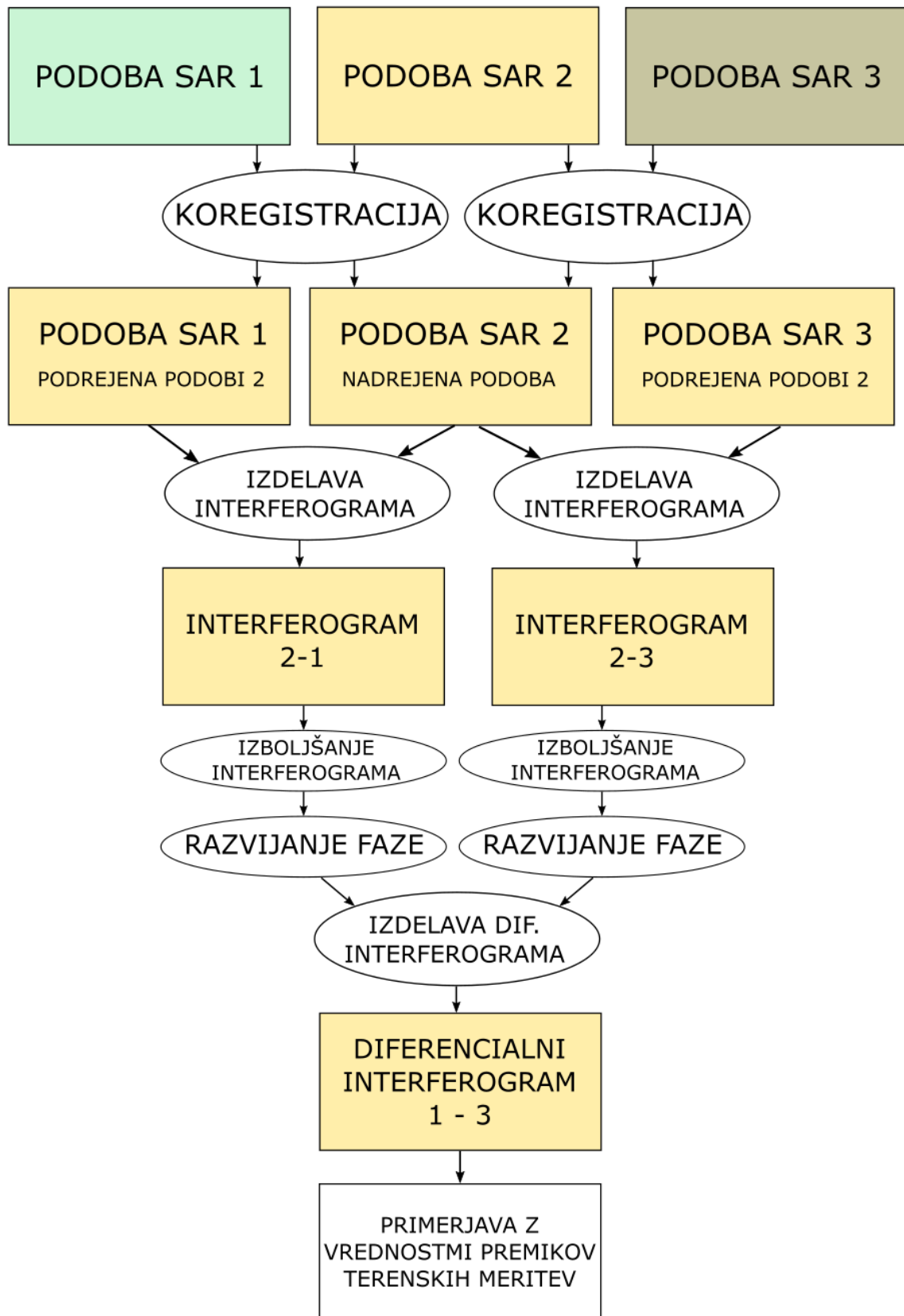
## 4.2 Metodologija opazovanja premikov z diferencialno interferometrijo

Metodologija, uporabljena za izdelavo diferencialnega interferograma, je razvidna iz slike 25.

Prvi del postopka do obrezanja podobe na želeno območje je za posamičen interferometričen par skoraj enak kot v prvem delu naloge. Razlika je le v izbiri podatkov: na osnovi rezultatov prvega dela naloge smo izbrali podatke treh zaporednih preletov z najboljšo koherenco med njimi. Za nadrejeno podobo smo vedno izbrali drugo podobo, saj bo druga od treh podob vedno imela boljšo koherenco s prvo in tretjo kot bi imeli prva in tretja med sabo, dobra koherenca pa je, kot smo že zapisali, ključna.

Sledilo je izboljšanje interferograma, kar smo dosegli s filtriranjem faze in terenskim popravkom. Od tod smo celoten postopek izvedli dvakrat, enkrat z uporabo večkratnih pogledov in enkrat brez. Filtriranje faze z Golsteinovim faznim filtrom (Goldstein in sod., 1998) in terenski popravek Range-Doppler smo izvedli vsakič.

Po razvijanju faze je sledila izdelava diferencialnega interferograma po metodi Zebkerja in sod. (1994). Pri razvijanju faze pride do pojava, da ima vsak interferogram z razvito fazo svoje višinsko izhodišče, oziroma izhodišče v smeri gledanja satelita. Izračunan premik zato vsebuje poleg premika tudi zamik, ki je naključen. Zamik smo odpravili z izbiro točke GNSS mreže, ki je z njenimi poznanimi premiki predstavljala izhodišče za premike v diferencialnem interferogramu. Z odpravo zamika smo dosegli cilj, izdelan diferencialni interferogram. Iz njega smo odčitali vrednosti premikov in jih primerjali z dejanskimi premiki, izmerjenimi z GNSS izmero.



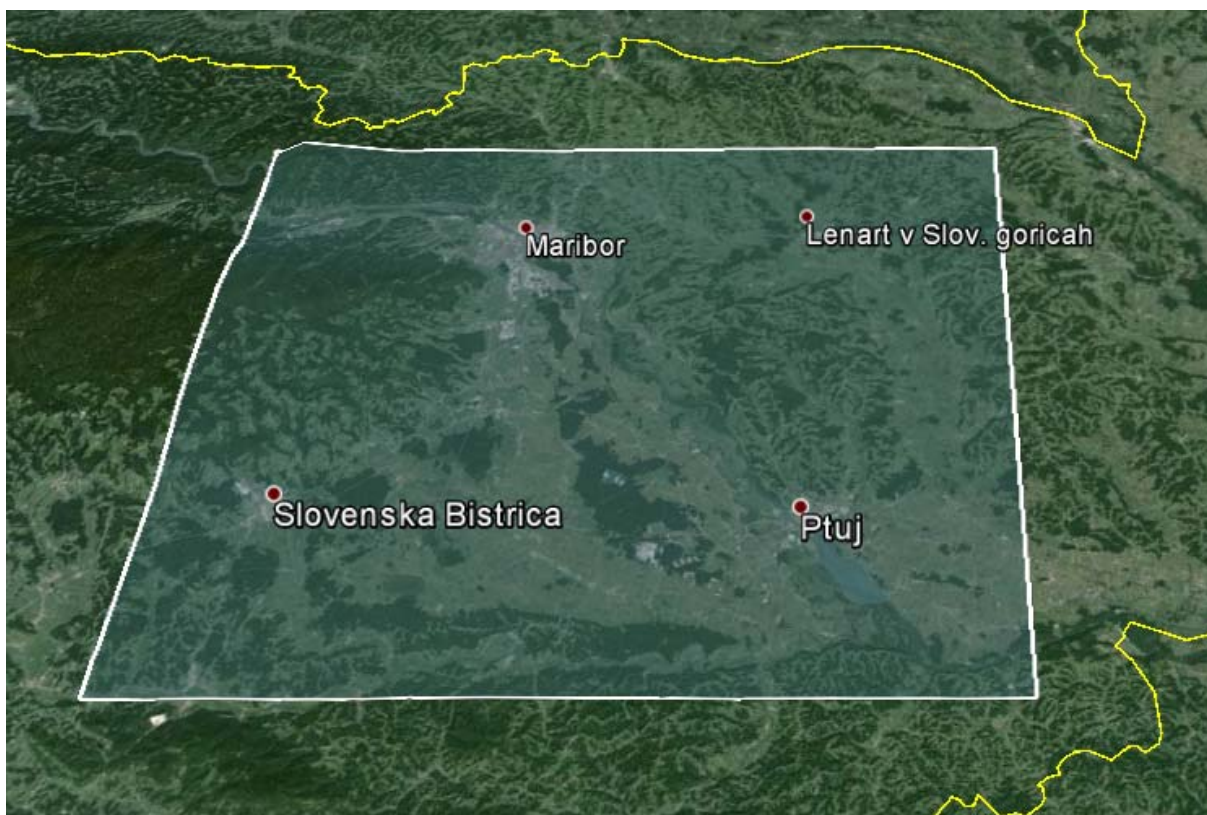
Slika 24: Prikaz metode drugega dela naloge: opazovanje premikov z diferencialno interferometrijo.



## 5 REZULTATI IN ANALIZA

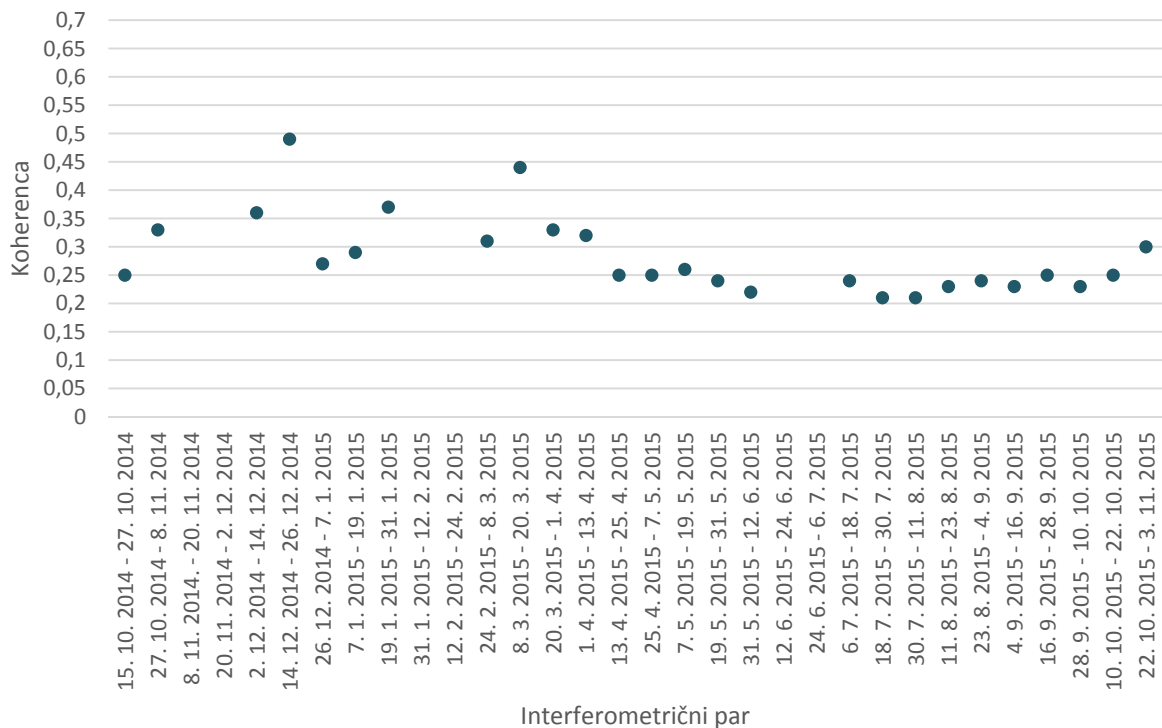
### 5.1 Spreminjanje koherence glede na rabo tal in čas snemanja

Za testno območje smo izbrali območje, ki zajema Štajersko: mesta Maribor, Ptuj in Slovensko Bistrico, izrazito kmetijska območja Dravske doline in tako nižinske kot višinske gozdove. Poleg raznolike rabe in dobre zastopanosti izbranih treh kategorij rabe je območje ustrezno tudi zaradi svoje velikosti in predstavlja lep presek podatkov, ki jih imamo na voljo: podpasa IW2 izbranega območja podobe SAR in namenske rabe tal. Na sliki 26 prikazujemo izbrano območje, kjer smo najprej pridobili srednjo vrednost koherence za celotno območje skozi leto in nato še za posamezno rabo.



Slika 25: Območje za spremljanje vrednosti koherence (Vir podatkov: Google Earth, 2016).

Na sliki 27 prikazujemo graf srednje vrednosti koherence na izbranem območju za obdobje od 15. 10. 2014 do 3. 11. 2015. To obdobje smo izbrali, ker ostaja znotraj njega območje relativne tirnice 146 še primerljivo. Po tem datumu se spremeni v tolikšni meri, da podatek o srednji vrednosti ni več primerljiv, saj območje podobe SAR ne zajema več celega našega testnega območja. Uporabili smo vse podatke, ki so bili za to obdobje na voljo, kot smo v nalogi že omenili, nekateri podatki niso dostopni, zato na sliki 27 manjka informacija o koherenci za nekaj interferometričnih parov.

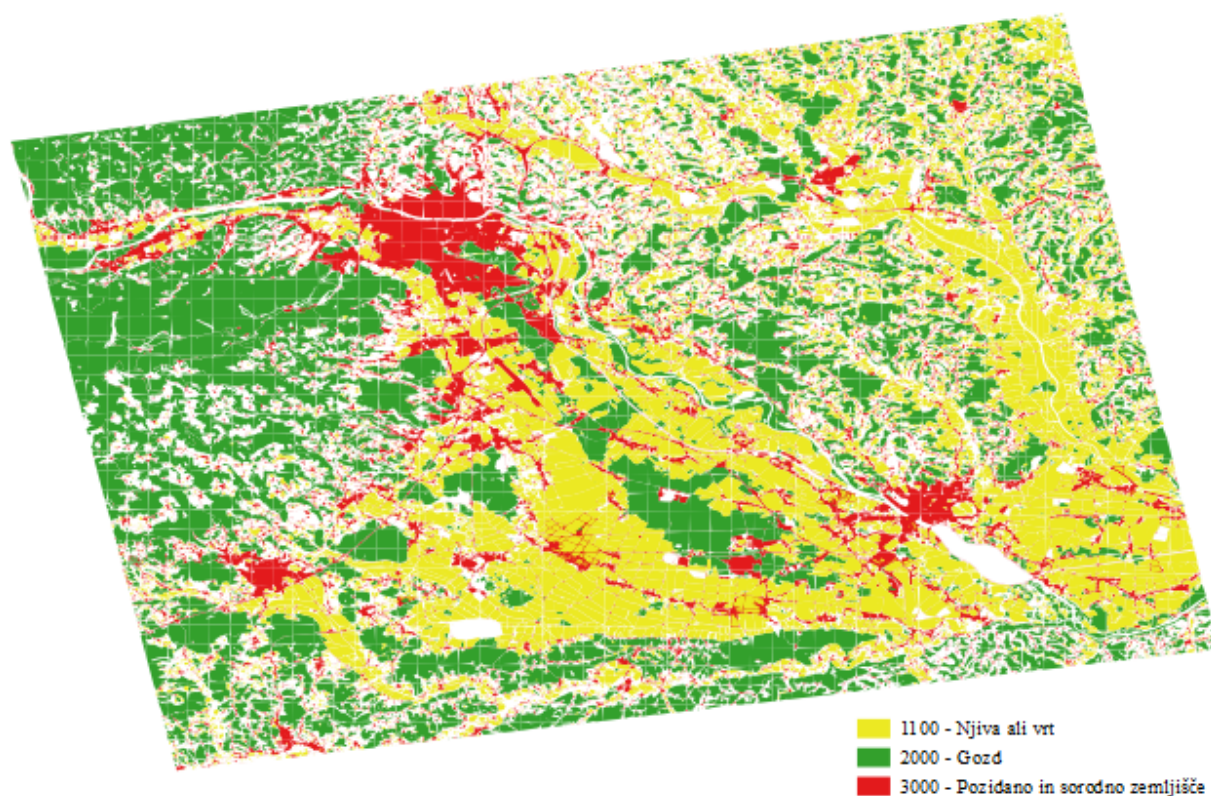


Slika 26: Graf srednje vrednosti koherence za interferometrične pare v obdobju 15. 10.2014 – 3. 11. 2015, za celotno izbrano testno območje.

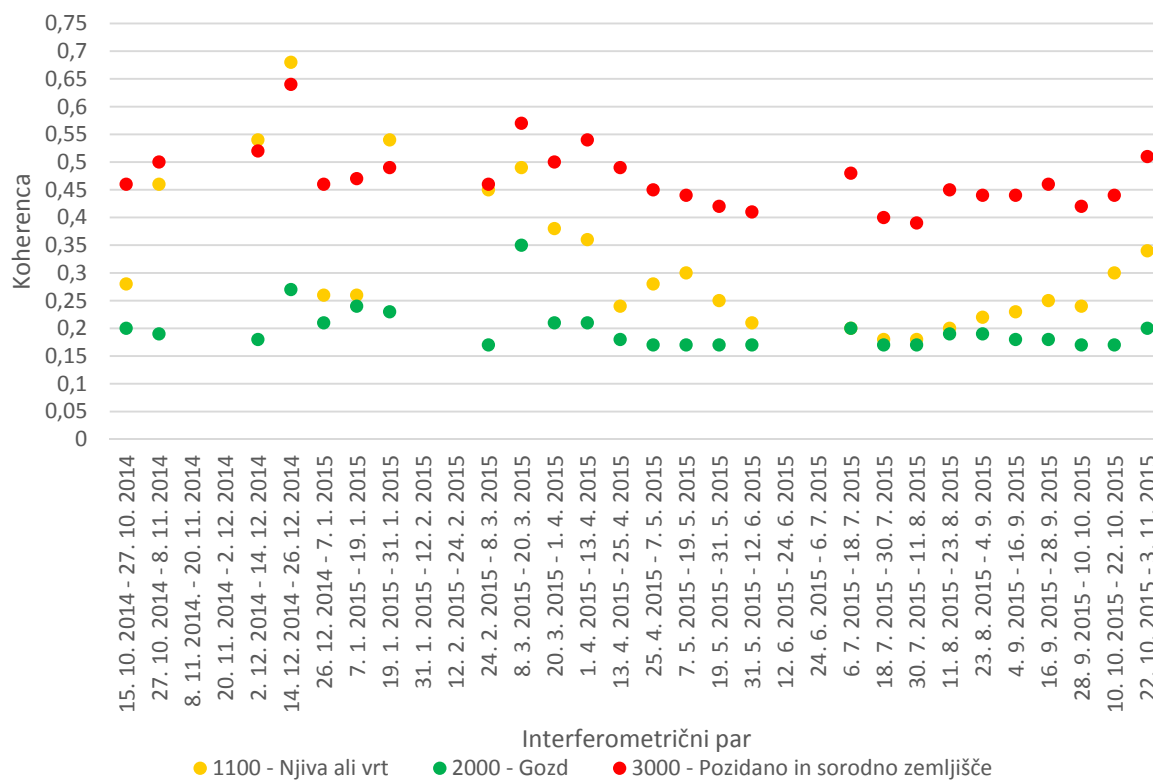
Na celotnem območju se v mesecih od aprila do oktobra ohranja vrednost koherence, ki je nekje med 0,2 in 0,3, kar je relativno nizko in predstavlja težavo za razvijanje faze. Izrazite dvige koherence v obdobju od novembra do marca lahko pojasnimo z zimskimi golimi drevesi in pomanjkanjem druge vegetacije, ki takrat miruje, na primer travniki in prazne njive. Izrazite padce koherence v istem obdobju pojasnjujemo z vremenskimi pojavi kot sta dež in sneg. Znatni padec koherence v začetku januarja lahko pojasnimo s sneženjem med preletoma (ARSO, 2016). Kljub izrazitemu nihanju srednje vrednosti koherence v obdobju zime, je iz slike 27 razvidno, da je bila v izbranem obdobju enega leta koherenca najboljša med pozno jesenjo in zgodnjo pomladjo. Največja srednja vrednost koherence v celem letu je v interferometričnem paru 14. 12. 2014 - 26. 12. 2014 dosegla vrednost 0,49.

V nadaljevanju smo koherenco opazovali na istem območju in v istem časovnem obdobju, le da smo srednjo vrednost koherence računali za posamično rabo tal. Izbrali smo tri najbolj pogoste rabe tal, ki se med seboj tudi močno razlikujejo po koherenci. Na sliki 28 je testno območje, na katerem prikazujemo rabe tal, za katere smo analizirali srednjo vrednost koherence. Gre za rabe s šifro 1100 – njiva ali vrt, 2000 – gozd in 3000 – pozidano in sorodno zemljišče. Na sliki 29 prikazujemo rezultate analize: gibanje srednje vrednosti koherence skozi leto za območja različno rabe tal.

Viri praviloma navajajo urbana območja za območja z najboljšo koherenco, poleg skalnatih območij in puščav, gozd pa je praviloma znan po slabi koherenci. Večinoma so rezultati sledili našim pričakovanjem, da bo območje gozda imelo stalno najslabšo koherenco. Najboljšo koherenco smo pričakovali v vseh interferometričnih parih za pozidano in sorodno zemljišče, nekje vmes pa naj bi se gibala srednja vrednost koherence za njive in vrtove, glede na obdelovalno sezono.



Slika 27: Izbrane tri kategorije rabe tal na testnem območju (Vir podatkov: MKGP, 2016).

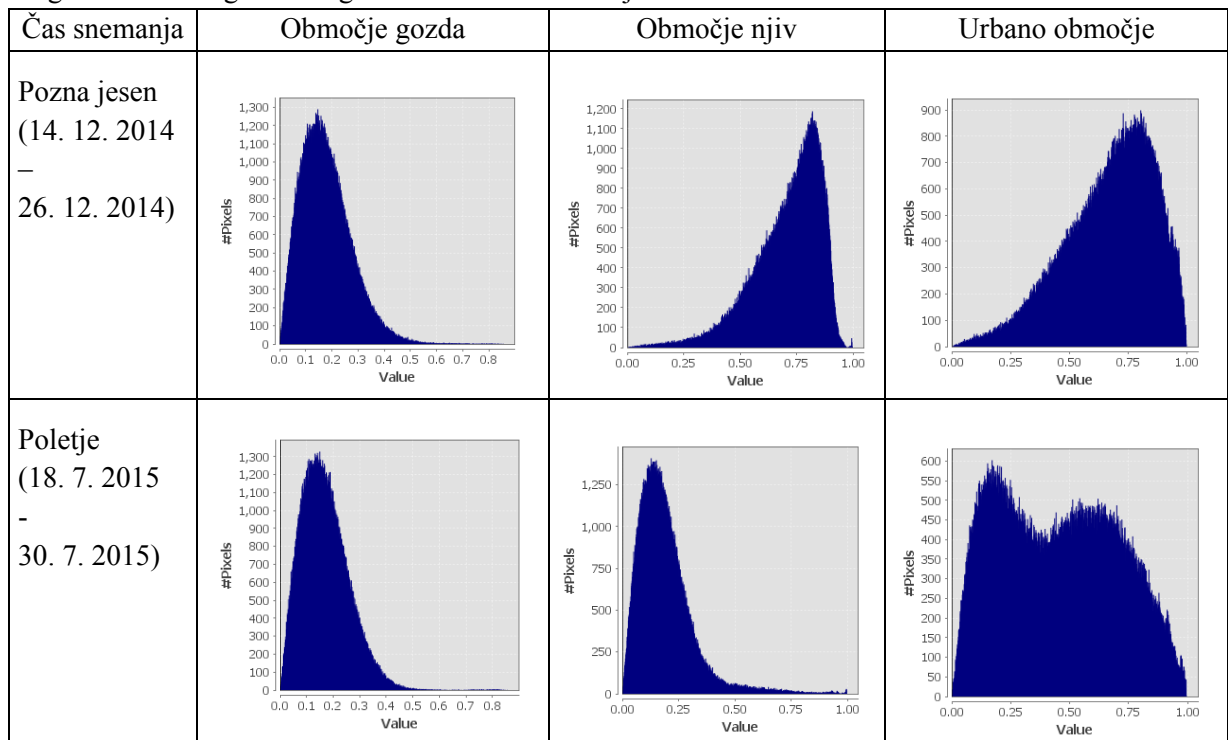


Slika 28: Graf srednje vrednosti koherence glede na rabo tal.

Skozi leto je koherenca dokaj konstantna znotraj posamezne rabe in sledi trendu koherence na celotnem območju. Gozd je dosegel najboljšo koherenco 0,39 v interferometričnem paru 8. 3. 2015 - 20. 3. 2015, v interferometričnem paru 14. 12. 2014 - 26. 12. 2014 pa sta najvišjo vrednost dosegli koherenca na pozidanih in sorodnih zemljiščih, 0,63, in njivah ali vrtovih, 0,68. Medtem ko imata kategoriji gozd ter pozidana in sorodna zemljišča v toplejši polovici leta dokaj konstantno koherenco, se koherenca njiv in vrtov zaradi rasti in žetve pridelka dviga in spušča. Presenetilo nas je, ko se je v pozni jeseni koherenca območja njiv in vrtov približala koherenci območja pozidanih in sorodnih zemljišč in jo preseгла. Razlog za ta pojav je verjetno dejstvo, da se na urbanih območjih nahaja nekaj vegetacije v obliki drevoredov, parkov, ta vegetacija pa niža koherenco. Splošnemu naštevanju najbolj koherentnih tipov zemeljskega površja lahko glede na rezultate te naloge dodamo še območja njiv in vrtov v času zime, saj najvišja srednja vrednost koherence za posamične interferometrične pare po rabah pripada ravno njivam in vrtovom.

Nihanje koherence na različnih rabah tal dobro opišejo histogrami. V preglednici 5 prikazujemo histograme za enega od poletnih in enega jesenskih interferometričnih parov, kjer se jasno vidi, da se koherenca gozda med tema dvema interferogramoma približno ohranja, da njivam zelo niha koherenca skozi letne čase in da ima histogram urbanega območja v času bujne vegetacije dva vrhova, v času pozne jeseni pa samo enega.

Preglednica 5: Pregled histogramov za testna območja.



Obdelali smo vse podatke, ki so bili za izbrano relativno tirnico na voljo. Če bi izbrali drugo relativno tirnico, se rezultati, stabilnost območja podobe in popolnost podatkov verjetno ne bi bistveno razlikovali. Kljub temu, da so rezultati sad analize podatkov za eno leto SAR opazovanj in bi morda za zanesljivejšo napoved koherence želeli obdelati podatke za več kot le eno leto, so rezultati analize srednje vrednosti dovolj zanesljivi, da lahko iz njih sklepamo na obnašanje te vrednosti v prihodnjih

opazovanjih. Na koherenco sicer vsako leto vplivajo tudi nadmorska višina, vremenski in drugi pogoji, ampak vseeno naši rezultati nudijo dovolj dobro usmeritev za delo, kje v letu je bolj verjetno, da bo koherenca dobra in zato rezultati celotne raziskave boljši.

Za SAR opazovanja je torej najbolj primerno obdobje med novembrom in marcem, ampak le, kadar med preletoma ni izrazitih vremenskih sprememb. Med aprilom in oktobrom lahko pričakujemo dokaj konstantno srednjo vrednost koherence med 0,2 in 0,3. V nadaljevanju ugotavljamo, da so urbana območja skozi celo leto najbolj primerna za analize, v času zime pa so primerna tudi območja njiv in vrtov.

Rezultati te analize so nam služili kot kriterij za izbor datumov zaporednih treh preletov, za katere velja, da imata iz njih izdelana interferograma najvišjo koherenco. Te podobe smo uporabili pri oceni premikov. Najvišja srednja vrednost koherence obljublja optimalne rezultate. V preglednici 6 prikazujemo dvakrat po tri zaporedne prelete, katerih podobe SAR so med seboj najbolj koherentne. Od tega poglavja dalje jih bomo imenovali po letnem času in sicer jeseni in pomladi.

Preglednica 6: Preleti, izbrani za diferencialno interferometrijo.

	Prvi prelet	Drugi prelet	Tretji prelet
Jesenski diferencialni interferogram	2. 12. 2014	14. 12. 2014	26. 12. 2014
Pomladni diferencialni interferogram	8. 3. 2015	20. 3. 2015	1. 4. 2015

## 5.2 Uporaba diferencialne interferometrije

V drugem delu naloge smo za testno območje uporabili območje Velenja z okolico. Izbrali smo dve testni območji, veliko in majhno. Sprva smo izdelali diferencialni interferogram za veliko območje, ki pa smo ga kasneje zmanjšali, da smo dobili uporabnejše rezultate. Kriteriji za izbiro majhnega območja, so zapisani v poglavju 5.2.2. Veliko in majhno testno območje prikazujemo na sliki 30.

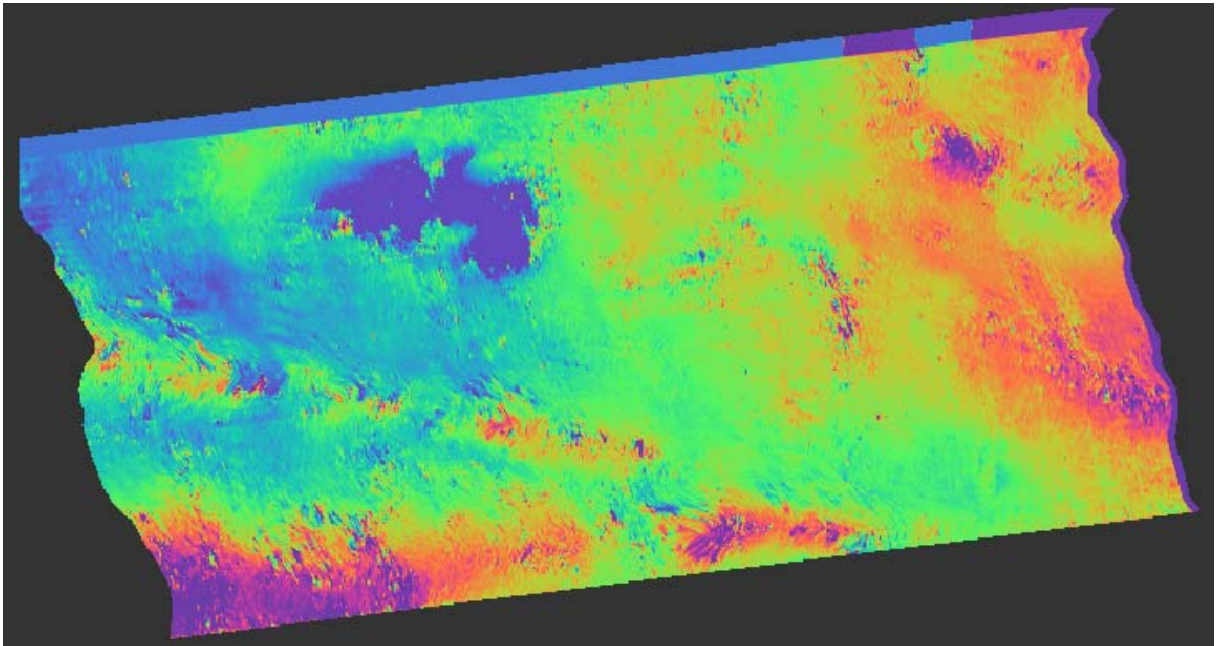
Razvijanje faze se je po pričakovanjih izkazalo za najbolj problematičen korak v postopku. Uspešnost razvijanja ocenjujemo vizualno. Kadar so vidni veliki preskoki v vrednostih razvite faze (barve na podobi), je prišlo do napake v razvijanju. Kadar premiki med sosednjimi rastrskimi celicami oziroma območji znotraj testnega območja niso večji od valovne dolžine sistema, je uspešnost razvijanja faze odvisna od koherence. Uporabili smo najboljšo koherenco, ki je na voljo (prelete pozne jeseni in zgodnje pomladi), zato razvijanja faze ne moremo izboljšati. Na slikah 31 in 32 prikazujemo razvito fazo za jesenske interferograme. Na sliki 31 prikazujemo primer najbolj uspešnega razvijanja faze interferometričnega para z najboljšo srednjo vrednostjo koherence. Na sliki 32 prikazujemo primer manj, a še vedno nadpovprečno uspešnega razvijanja faze za izbrano območje. Na sliki 32 so posebej izraziti preskoki – kontrasti v vrednosti razvite faze, kar nakazuje na neuspešno razvijanje faze na območju preskoka. Na obeh podobah razvite faze je jasno razvidno območje jezer in hribovitih pobočij.

Razvijanje faze za pomladne prelete je dalo podobne rezultate – en interferogram z boljšim (8. 3. 2015 - 20. 3. 2015) in en s slabšim razvijanjem (20. 3. 2015 - 1. 4. 2015). Na osnovi takšnih razvitih faz smo izračunali diferencialne interferograme.

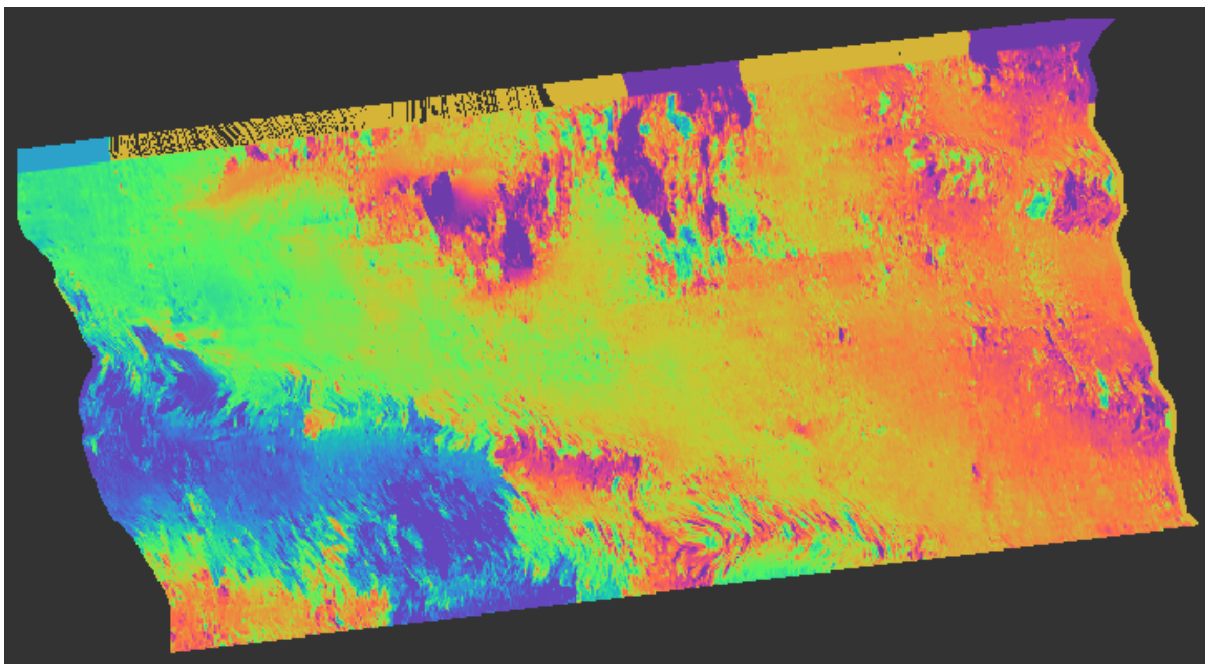
Pri vseh interferogramih je bila faza uspešno razvita le na območju diagonale posnetka zgoraj levo / spodaj desno. Videli smo, da lahko uporabne rezultate DInSAR pričakujemo zgolj v Velenjski dolini, brez okoliških hribov in naselij. Tudi na teh območjih z navidezno dobro razvito fazo smo opazili, da ima generalno gledano dobro razvita faza na manjših območjih še vedno preveč izrazite preskoke vrednosti, motnje in nezvezne vrednosti sosednjih pikslov.



Slika 29: Testni območji za diferencialno interferometrijo: pravokotnik prikazuje veliko uporabljeno območje, bela poligona pa manjše uporabljeno območje (Vir podatkov: Google Maps, 2016).



Slika 30: Razvita faza za interferogram 14. 12. 2014 – 26. 12. 2014 na izbranem testnem območju.



Slika 31: Razvita faza za interferogram 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014 na izbranem testnem območju.

### 5.2.1 Diferencialni interferogram za večje izbrano območje

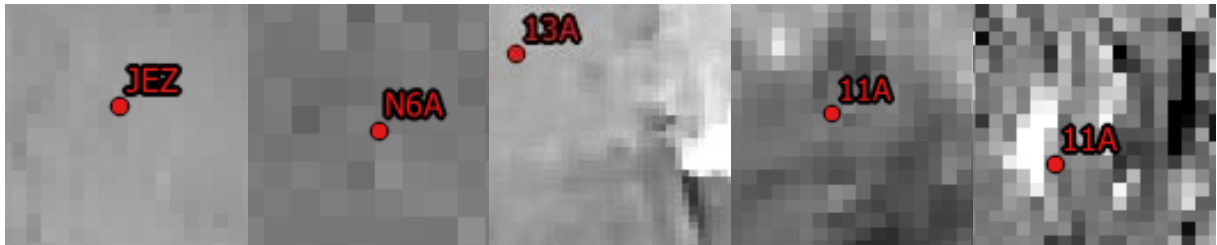
Diferencialni interferogram smo izračunali za celotno izbrano območje, za jesen brez in z uporabo večkratnih pogledov in pomlad brez in z uporabo večkratnih pogledov, se pravi imamo skupaj štiri komplete rezultatov, dva za jesen in dva za pomlad. Zaradi različnih višinskih izhodišč interferogramov oziroma izhodišč v smeri gledanja radarja, do katerih pride med razvijanjem faze, diferencialni interferogrami vsebujejo naključen zamik. Na slikah 34-41 prikazujemo točke GNSS mreže in premik v smeri gledanja radarja z zamikom oziroma točke GNSS mreže in koherenco enega od dveh interferometričnih parov, ki smo ju uporabili za izračun premika in sicer tistega s slabšo koherenco. Točke, ki so prikazane na slikah, smo ohranili za analizo, tiste, ki pa jih na sliki ni, pa smo iz analize predhodno izključili, saj se nahajajo povsem izven območja dobre koherence in/ali dobrega razvijanja faze, ali pa jih preprosto ni na našem območju. Izločili smo torej samo tiste točke GNSS mreže, za katere smo bili prepričani, da si z njimi v nadaljevanju ne moremo več pomagati.

Na slikah 34, 36, 38 in 40 opazimo jasne motnje v vrednosti premika z zamikom, bele in črne lise različnih velikosti, ki nakazujejo napake v vrednostih zaradi neuspešnega razvijanja faze na tistem območju. Vrednosti premika v legendi niso pomembne, saj vsebujejo še naključen, po celem območju enak zamik. Ko opazujemo te slike je torej najbolj relevanten pojav nihanje vrednosti premika z zamikom: črne in bele lise.

Za vsako GNSS točko posebej smo ocenili uspešnost razvijanja faze z oceno od 1 do 5, kjer 5 pomeni najboljše razvijanje faze. Primeri ocen so prikazani na sliki 33, kriteriji za ocene pa so naslednji:

- 5: območje dobrega razvijanja faze, sosednje rastrske celice so podobnih vrednosti,
- 4: območje dobrega razvijanja faze, sosednje rastrske celice so različnih vrednosti,
- 3: območje dobrega razvijanja faze je vmes prekinjeno s slabim ali pa je razvijanje nekje med slabim in dobrim,

- 2: območje slabega razvijanja faze,
- 1: območje najslabšega razvijanja faze.



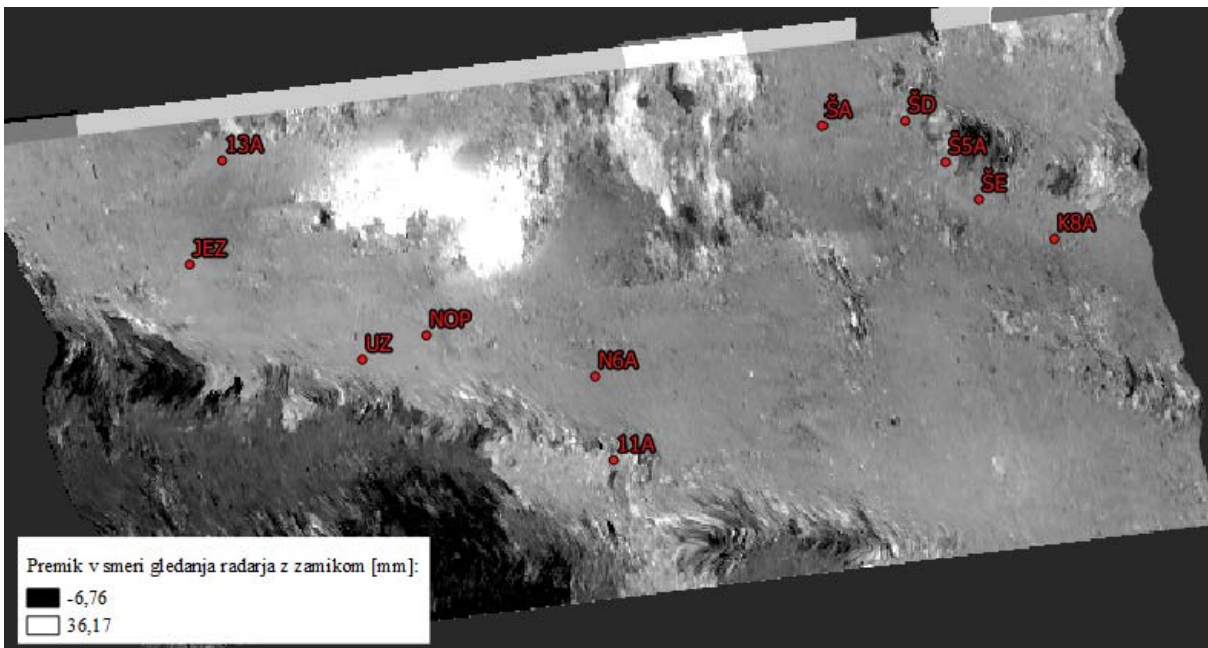
Slika 32: Primeri ocen razvijanja faze: po vrsti od ocene 5 do ocene 1.

Da smo odpravili zamik, smo raster višinsko oziroma v smeri gledanja radarja »pritrtdili« na eno od GNSS točk. Izbrali smo vsakič tisto točko, za katero je najbolj veljalo, da se nahaja na območju dobrega razvijanja faze in ima dobro koherenco in je zato najbolj zanesljiva. Ostale točke smo uporabili za kontrolo vrednosti. Z odpravo zamika smo izračunali premik vseh točk, ki je absoluten v smislu izhodišča (vrednost pomeni premik v smeri gledanja radarja in ne razlike do referenčne točke) in relativen v smislu, da je vrednost premika odvisna od točnosti premika referenčne točke. Premike točk smo primerjali z dano vrednostjo premika GNSS izmere za 24 dni, kolikor znaša časovni razmik med 3 preleti, ob predpostavki, da so premiki skozi leto enakomerni. V preglednicah 6, 7, 8 in 9 so za vsakega od štirih rastrov premika z zamikom za vsako točko GNSS mreže prikazani uspešnost razvijanja faze, vrednost koherence v manj koherentnem paru, vrednost DInSAR premika z zamikom, DInSAR premik brez zamika glede na referenčno točko, GNSS premik v 24 dneh in napaka v premiku DInSAR glede na dane GNSS premike.

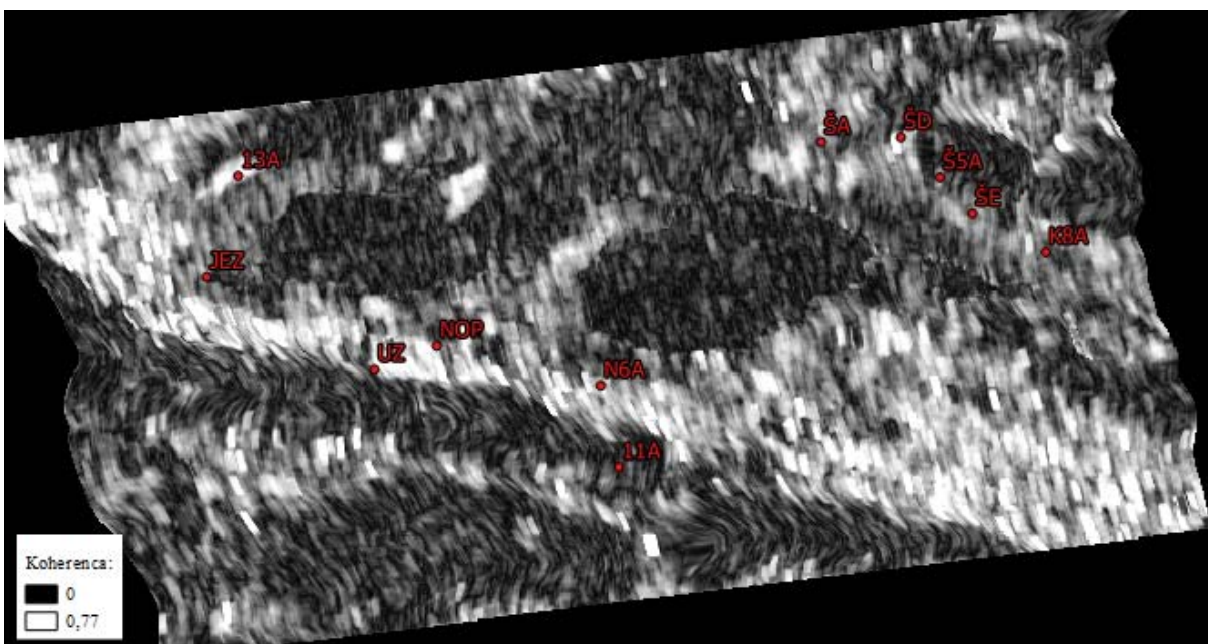
#### 5.2.1.1 Jesen brez uporabe večkratnih pogledov

Rezultate za jesen brez uporabe večkratnih pogledov prikazujejo slika 34, slika 35 in preglednica 7. Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže, se za GNSS točke giblje od -8,1 do 3,0 mm, kar je za tako kratko obdobje preveč. Verjetne razloge najdemo v preglednici v stolpcu Ocena uspešnosti razvijanja faze in stolpcu Vrednost koherence v manj koherentnem interferogramu. Če gledamo samo napako v vrednosti DInSAR za točke, katerih ocena razvijanja faze je vsaj 4, pridemo do razpona napake -4,9 do 0,2 mm, kar je boljše, a še vedno slabše od pričakovanih vrednostih.





Slika 33: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - jesen brez uporabe večkratnih pogledov.

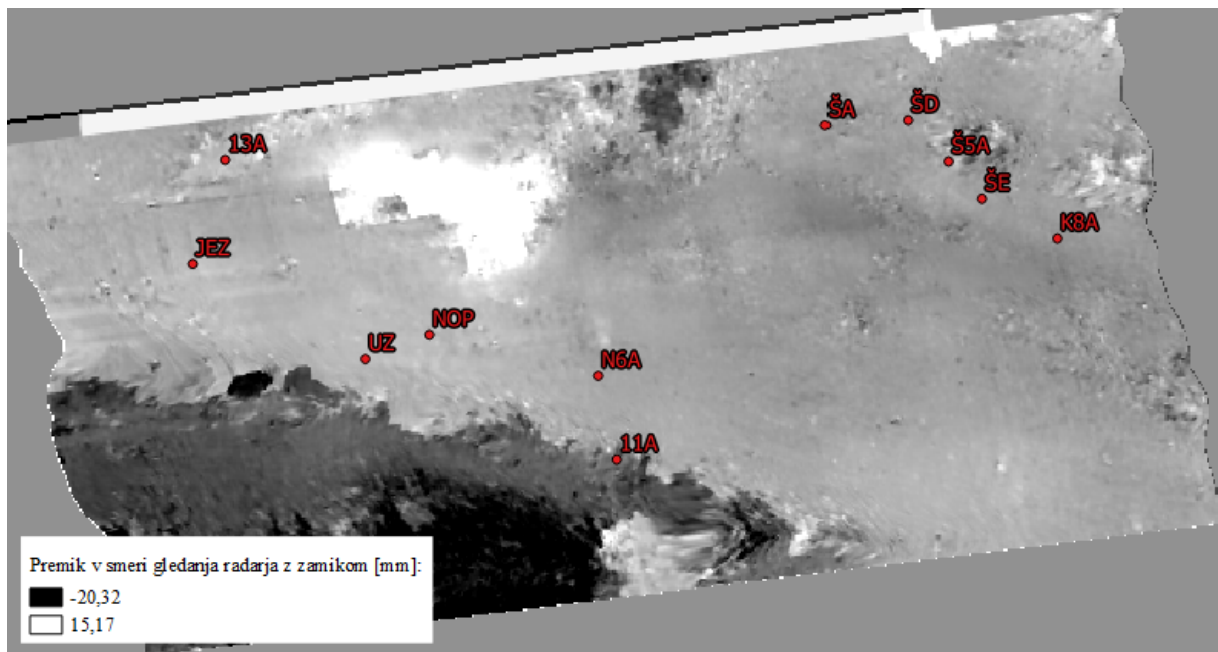


Slika 34: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014, brez uporabe večkratnih pogledov.

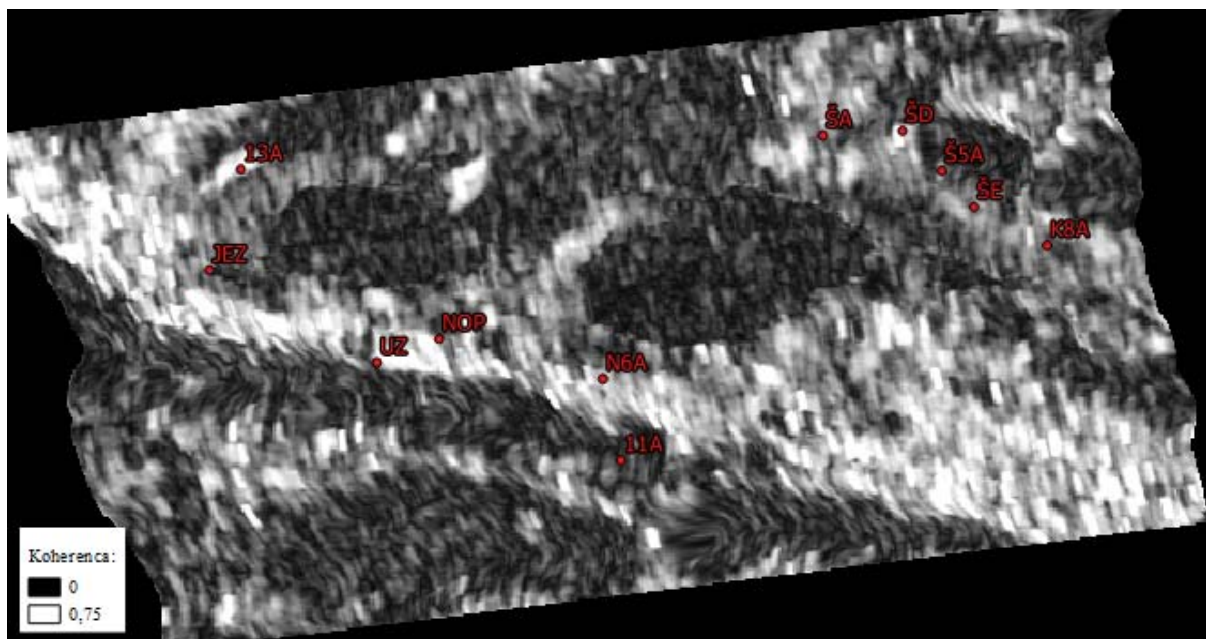
Preglednica 7: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za jesen brez uporabe večkratnih pogledov.

Ime točke	Ocena uspešnosti razvijanja faze	Vrednost koherence v manj koherentnem interferogramu	Premik + zamik [mm]	Premik brez zamika (glede na referenčno točko JEZ) [mm]	GNSS premik v 24 dneh [mm]	Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže [mm]
11A	1	0,18	23,1	2,9	-0,07	3,0
JEZ	5	0,44	20,2	0,0	-0,03	/
13A	5	0,77	19,0	-1,2	-0,92	-0,3
NOP	4	0,65	18,9	-1,3	-1,12	-0,2
UZ	4	0,27	18,6	-1,6	-0,26	-1,3
N6A	4	0,65	17,6	-2,6	-0,40	-2,2
Š5A	3	0,50	17,3	-2,9	0,34	-3,3
ŠA	4	0,43	15,3	-4,9	-0,05	-4,9
ŠD	3	0,57	17,1	-3,1	-0,20	-2,9
ŠE	4	0,40	15,2	-4,9	-0,10	-4,9
K8A	3	0,31	12,1	-8,1	-0,03	-8,1

#### 5.2.1.2 Jesen z uporabo večkratnih pogledov



Slika 35: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - jesen z uporabo večkratnih pogledov.



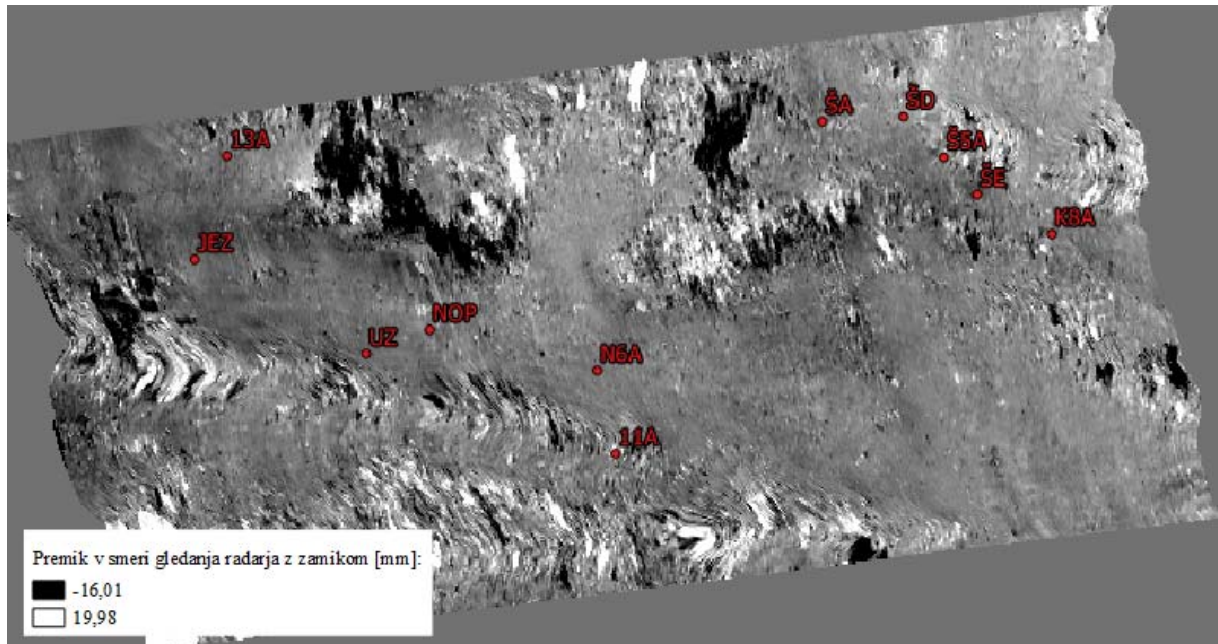
Slika 36: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 14. 12. 2014 – 2. 12. 2014, z uporabo večkratnih pogledov.

Preglednica 8: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za jesen z uporabo večkratnih pogledov.

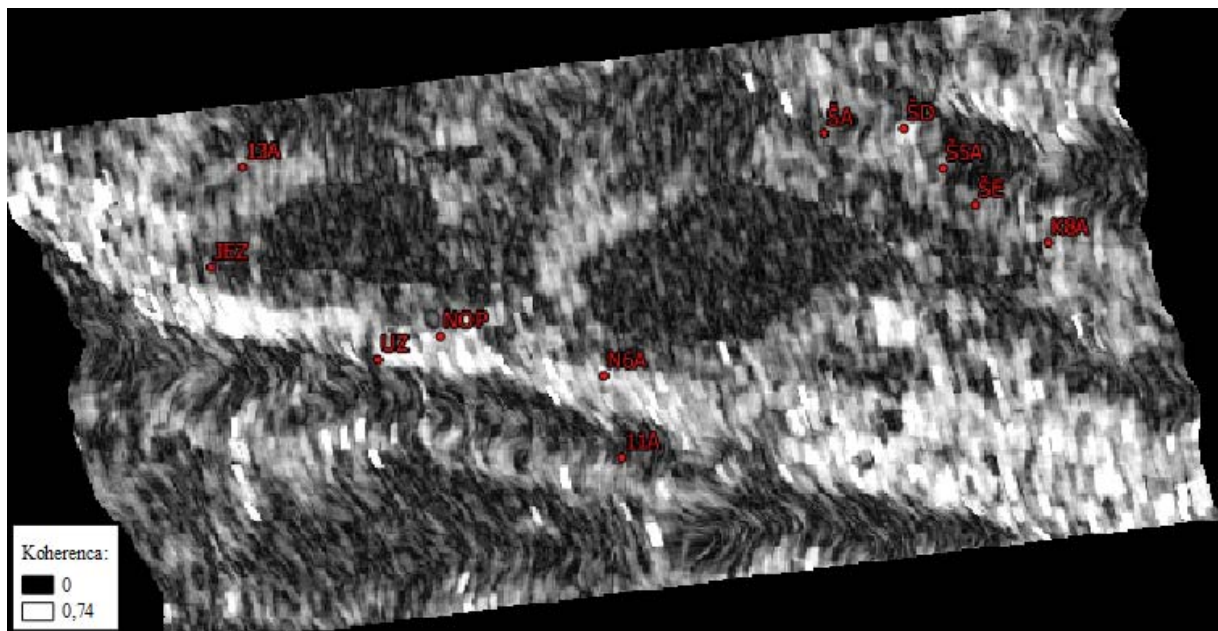
Ime točke	Ocena uspešnosti razvijanja faze	Vrednost koherence v manj koherentnem interferogramu	Premik + zamik [mm]	Premik brez zamika (glede na referenčno točko N6A) [mm]	GNSS premik v 24 dneh [mm]	Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže [mm]
11A	1	0,23	-3,6	-8,0	-0,07	-7,9
JEZ	4	0,4	5,4	1,1	-0,03	1,1
13A	3	0,78	6,0	1,7	-0,92	2,6
NOP	5	0,51	6,0	1,7	-1,12	2,8
UZ	5	0,4	6,2	1,9	-0,26	2,1
N6A	5	0,63	3,9	-0,4	-0,40	/
Š5A	4	0,48	2,8	-1,6	0,34	-1,9
ŠA	4	0,4	1,4	-3,0	-0,05	-2,9
ŠD	4	0,55	2,8	-1,5	-0,20	-1,4
ŠE	5	0,38	2,0	-2,3	-0,10	-2,2
K8A	5	0,29	-0,2	-4,5	-0,03	-4,4

Rezultate za jesen z uporabo večkratnih pogledov prikazujejo slika 36, slika 36 in preglednica 8. Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže se za GNSS točke giblje od -7,9 do 2,8 mm oziroma pri točkah, kjer je ocena razvijanja faze vsaj 4, od -4,4 do 2,8 mm. Rezultati za jesen brez uporabe večkratnih pogledov so torej boljši od jeseni z uporabo večkratnih pogledov, a noben način ne zagotavlja vrednosti, ki bi bile bližje pričakovanim, danim premikom.

### 5.2.1.3 Pomlad brez uporabe večkratnih pogledov



Slika 37: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - pomlad brez uporabe večkratnih pogledov.



Slika 38: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 20. 3. 2015 – 2. 4. 2012, brez uporabe večkratnih pogledov.

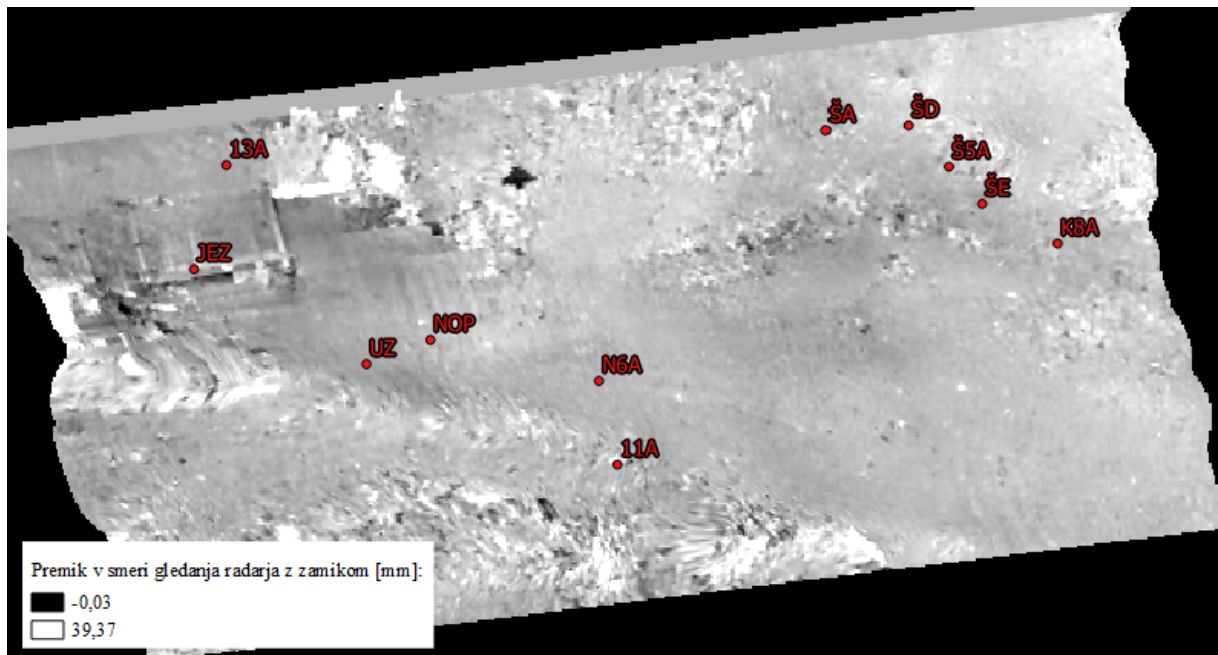
Preglednica 9: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za pomlad brez uporabe večkratnih pogledov.

Ime točke	Ocena uspešnosti razvijanja faze	Vrednost koherence v manj koherentnem interferogramu	Premik + zamik [mm]	Premik brez zamika (glede na referenčno točko N6A) [mm]	GNSS premik v 24 dneh [mm]	Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže [mm]
I1A	1	0,12	4,4	3,1	-0,07	3,1
JEZ	4	0,58	-0,9	-2,3	-0,03	-2,3
I3A	2	0,52	-2,6	-4,0	-0,92	-3,0
NOP	3	0,68	1,8	0,4	-1,12	1,5
UZ	3	0,18	3,1	1,8	-0,26	2,0
N6A	4	0,67	1,0	-0,4	-0,40	/
Š5A	1	0,51	3,7	2,4	0,34	2,1
ŠA	1	0,28	-0,6	-2,0	-0,05	-1,9
ŠD	2	0,56	3,5	2,2	-0,20	2,4
ŠE	1	0,29	0,6	-0,7	-0,10	-0,6
K8A	2	0,51	0,9	-0,5	-0,03	-0,5

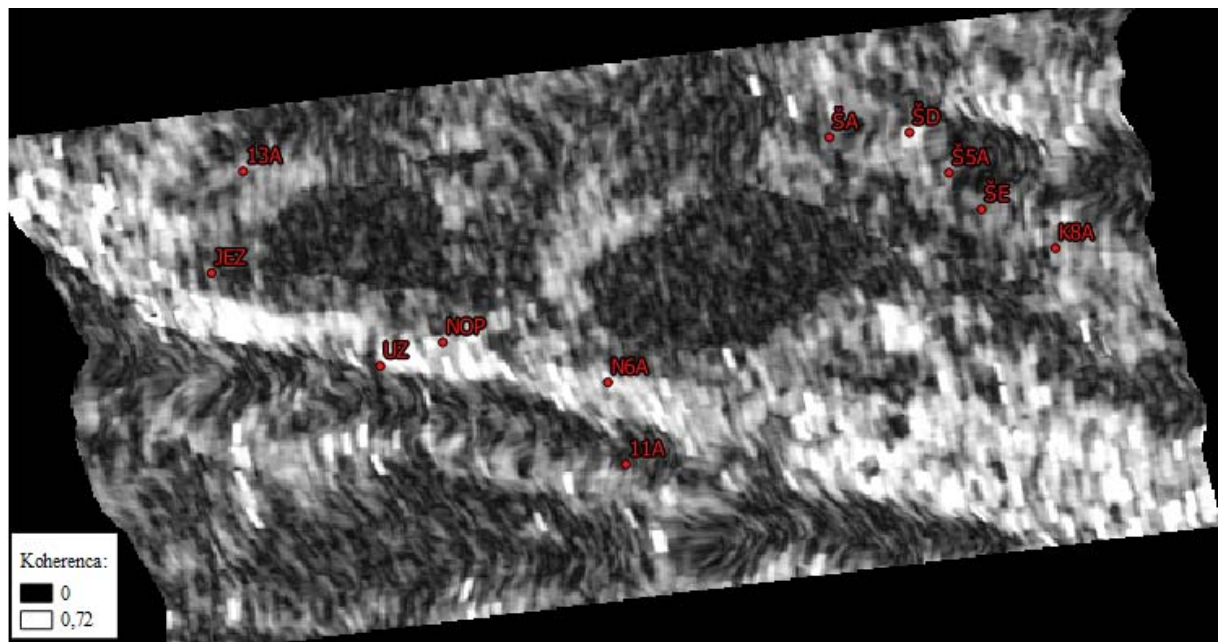
Rezultate za pomlad brez uporabe večkratnih pogledov prikazujejo slika 38, slika 39 in preglednica 9. Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže se za GNSS točke giblje od -3,0 do 3,1 mm. Ocena razvijanja faze vsaj 4 je dosežena le za dve točki, od tega je ena referenčna točka, zato je pri oceni rezultatov ne moremo upoštevati, vrednost napake za drugo pa je -2,3 mm. Pri tem je potrebno opozoriti, da se niti referenčna točka ne nahaja na območju najboljšega razvijanja faze, kar postavi celotne rezultate za pomlad brez uporabe večkratnih pogledov pod vprašaj.

#### 5.2.1.4 Pomlad z uporabo večkratnih pogledov

Rezultate za pomlad z uporabo večkratnih pogledov prikazujejo slika 40, slika 41 in preglednica 10. Tudi pri pomladi z uporabo večkratnih pogledov sta le dve točki na območju razvijanja z oceno 4 ali več, pri čemer je ena referenčna, druga pa ima napako v vrednosti -2,0 mm.



Slika 39: Točke GNSS mreže in premik, ki vključuje naključni zamik - pomlad z uporabo večkratnih pogledov.



Slika 40: Točke GNSS mreže in koherenca interferograma 20. 3. 2015 – 2. 4. 2012, z uporabo večkratnih pogledov.

Preglednica 10: Pregled opazovanih vrednosti za točke GNSS mreže za pomlad z uporabo večkratnih pogledov.

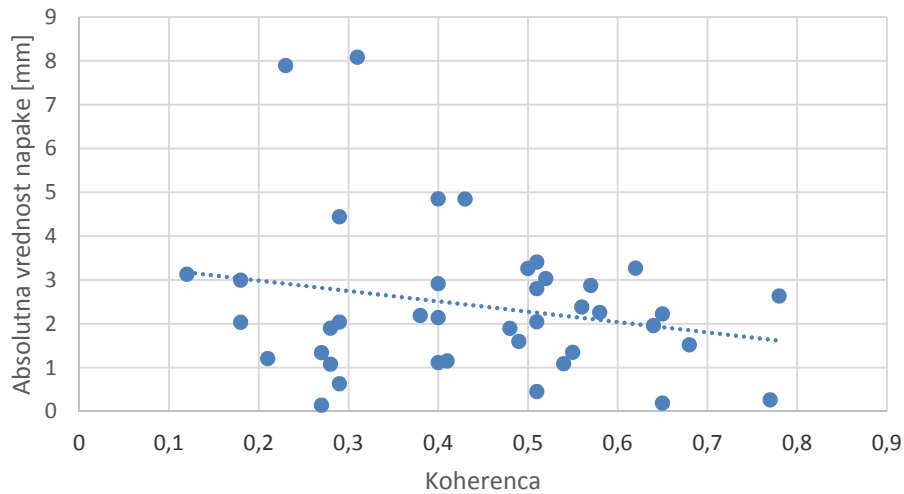
Ime točke	Ocena uspešnosti razvijanja faze	Vrednost koherence v manj koherentnem interferogramu	Premik + zamik [mm]	Premik brez zamika (glede na referenčno točko N6A) [mm]	GNSS premik v 24 dneh [mm]	Napaka v vrednosti DInSAR glede na meritve GNSS mreže [mm]
11A	2	0,21	30,2	1,1	-0,07	1,2
JEZ	1	0,49	30,6	1,6	-0,03	1,6
13A	3	0,54	27,0	-2,0	-0,92	-1,1
NOP	3	0,64	29,9	0,8	-1,12	2,0
UZ	5	0,29	26,7	-2,3	-0,26	-2,0
N6A	5	0,67	28,6	-0,4	-0,40	/
Š5A	3	0,51	32,8	3,7	0,34	3,4
ŠA	3	0,27	28,8	-0,2	-0,05	-0,1
ŠD	3	0,62	32,1	3,1	-0,20	3,3
ŠE	3	0,28	30,0	1,0	-0,10	1,1
K8A	3	0,41	27,8	-1,2	-0,03	-1,2

Pri vseh štirih diferencialnih interferogramih smo naleteli na podobno situacijo. Večina točk se nahaja na območju s slabim razvijanjem faze. Četudi se nahajajo na območju generalno dobrega razvijanja faze, vrednosti sosednjih pikslov pogosto toliko nihajo, da se na vrednost premika ne moremo zanesti, kar potrjujejo izračunane napake v vrednosti premika.

Svoje prispeva tudi slaba koherenca, saj so točke razporejene po celotnem območju, ne le po območju z dobro koherenco. Na sliki 42 prikazujemo absolutno vrednost napake DInSAR premika od vrednosti koherence. V graf smo vnesli vse GNSS točke iz štirih diferencialnih interferogramov, razen referenčnih točk. Razbrati se da trend, da z naraščajočo koherenco pada absolutna vrednost napake, jasno pa je, da koherenca ni edini dejavnik.

Točke GNSS mreže so po prostoru razporejene ne glede na koherenco in razvijanje faze. Ker smo za spremljanje premikov v izbranem časovnem obdobju imeli na voljo le ta, relativno majhen, nabor 11 točk, med katerimi glavnina ni na najbolj ustreznem območju za spremljanje premikov s tehniko DInSAR, so rezultati ustrezno slabi. Idealno bi bilo, če bi med mnogimi, recimo 100 točkami lahko izbrali 10 takih, ki se nahajajo na najboljšem območju glede razvijanja faze in koherence. Takrat bi verjetno dobili boljše rezultate.

Na večjem območju nam torej tehnika diferencialne interferometrije ne nudi uporabnih rezultatov. Območje opazovanja vrednosti premikov smo zato zmanjšali.



Slika 41: Graf absolutne vrednosti napake v premiku glede na koherenco, prikazani so podatki vseh GNSS točk iz štirih diferencialnih interferogramov, razen referenčnih točk.

### 5.2.2. Diferencialni interferogram za manjše izbrano območje

Da bi dobili boljše rezultate, smo se odločili preveriti še vrednosti premika izključno na območju dobre koherence in dobrega razvijanja faze. Ročno smo s prekrivanjem slojev razvite faze in koherence za vsakega od štirih diferencialnih interferogramov (jesen, jesen z uporabo večkratnih pogledov, pomlad in pomlad z uporabo večkratnih pogledov) izrisali poligon, znotraj katerega se nahajajo samo območja z dobro koherenco in uspešnim razvojem faze. Nato smo ta štiri območja prekrili in ohranili le območje, ki je zajeto v vseh poligonih. Na sliki 43 prikazujemo štiri poligone (sive) in končnega (črn), ki smo ga v nadaljevanju uporabili za analizo premikov. Na slikah 44, 45, 46 in 47 prikazujemo obrezane diferencialne interferograme, na katerih smo analizirali vrednost premika. Za referenčno točko smo pri vseh uporabili točko N6A, saj je med najbolj zanesljivimi in se tudi edina nahaja na izbranem majhnem območju.



Slika 42: Poligoni z dobro koherenco in dobrim razvijanjem faze vseh štirih diferencialnih interferogramov (sivi) in končni poligon, njihov presek, uporabljen za majhno območje opazovanja premikov (črn).





Slika 43: Diferencialni interferogram za majhno območje: jesen brez uporabe večkratnih pogledov.



Slika 44: Diferencialni interferogram za majhno območje: jesen z uporabo večkratnih pogledov.



Slika 45: Diferencialni interferogram za majhno območje: pomlad brez uporabe večkratnih pogledov.



Slika 46: Diferencialni interferogram za majhno območje: pomlad z uporabo večkratnih pogledov.

Medtem ko je na jesenskih diferencialnih interferogramih (slika 44 in 45) vidno večje posedanje v sredinskem delu, kjer smo ga tudi pričakovali, saj se tam nahaja premogovnik in se premog koplje in

skladišči, na pomladnih diferencialnih interferogramih (slika 45 in 46) večjega posedanja na območju premogovništva ni opaziti.

Povprečni premiki za posamičen manjši diferencialni interferogram na območju poligona z dobrim razvijanjem faze in dobro koherenco so prikazani v preglednici 11. Povprečni premiki za posamičen diferencialni interferogram dajo rezultate, ki so bližje realnemu posedanju. Iz rezultatov naše raziskave ni razviden pozitiven doprinos uporabe večkratnih pogledov, temveč nam le-ta poda kvečjemu slabše vrednosti rezultatov. Med pomladjo in jesenjo je v diferencialnem interferogramu bistvena razlika. Medtem ko se jesenska diferencialna interferograma obnašata po pričakovanjih: nakazujeta večje posedanje osrednjega dela območja, vrednosti na pomladnih ne znamo razložiti. Gibanje površja Zemlje sicer ni zgolj posledica časa in izkopavanja, temveč je lahko povezano tudi z večjimi količinami dežja (Amin in sod., 1997), tektoniko in podobnim.

Preglednica 11: Povprečen premik za interferograme majhnega območja.

	Jesen – brez uporabe večkratnih pogledov	Pomlad – brez uporabe večkratnih pogledov	Jesen – z uporabo večkratnih pogledov	Pomlad – z uporabo večkratnih pogledov
Povprečen premik v smeri gledanja radarja [mm]	-0,57	-0,24	0,08	-0,73

Oštir (2000) je pri izdelavi modela premikov z uporabo tehnike DInSAR sicer opazoval predvsem območje naselja Velenje, a je iz modela premikov na sliki 17, podobno kot v naši raziskavi, razvidno večje posedanje v okolici premogovnika. Prav tako ni dobil glede na terenske meritve točnih premikov, temveč premike pravega reda velikosti, podobno kot mi. Naši rezultati končnega manjšega diferencialnega interferograma torej vsaj v jesenskem diferencialnem interferogramu nudijo podobne rezultate – smiselna razporeditev vrednosti posedanja glede na prostor in rezultate pričakovanega reda velikosti glede na vrednosti premikov danih GNSS točk.

### 5.3 Možni razlogi za težave

Koherenca na celotnem območju je zaradi prisotnosti vegetacije relativno nizka. Posledično je oteženo razvijanje faze. Na nekaterih območjih pa so vrednosti kljub dobremu razvijanju in visoki koherenci še vedno preveč raznolike, da bi opisovale realno stanje. Glede na naše rezultate ne moremo z gotovostjo trditi, kaj je glavni razlog za to, sklepamo pa, da je glavni krivec za odstopanja v vrednosti premika atmosferski vpliv, ki ga v postopku nismo mogli eliminirati.

Tudi nekatere druge raziskave so prišle do zaključka, da je vpliv atmosfere na vrednost faze lahko ključen za kakovost rezultatov tehnike DInSAR. Za oceno in eliminacijo vpliva atmosfere na fazo je na voljo vse bolj uporabna metoda PSI.

V nalogi smo predpostavili, da se območje Velenja poseda linearno. Medtem ko je posedanje zaradi kopanja rude verjetno res linearno, saj izkopavanje poteka skozi celotno leto, ni rečeno, da je to edini

vzrok posedanja. Posedanje površja Zemlje se lahko pojavi tudi na zaradi padca nivoja podzemne vode (Holzer, 1976), tektonske aktivnosti (Hasanuddin, 2007) in drugih razlogov. Razlogi za dvig ali spust površja Zemlje niso predmet te naloge, a potrebno se je zavedati, da premiki niso nujno linearni. Če bi opazovali območje neke kamnite puščave, kjer je koherenca skozi celo leto visoka, bi bilo smiselno izdelati diferencialne interferograme skozi celo leto za vsake tri zaporedne prelete. Tako bi videli, v kolikšni meri so premiki res linearni in ali lahko premik 24 dni za tisto območje res posplošimo na celo leto. Na izbranem območju, za katerega je značilna gosta vegetacija, ob podatkih, ki jih imamo na voljo in zaradi drugih šibkih točk postopka, računanje diferencialnih interferogramov skozi celotno leto ni smiselno.

Zaradi nizkega števila točk GNSS mreže, ki se večinoma ne nahajajo na območju z dobrim razvijanjem faze in dobro koherenco, je tudi primerjava med premiki, izmerjenimi z GNSS izmero in s tehniko DInSAR manj zanesljiva.

## 6 ZAKLJUČEK

V okviru te magistrske naloge smo poiskali odgovore na naslednja raziskovalna vprašanja:

- Kakšno koherenco lahko pričakujemo glede na rabo tal in čas v letu?
- Katero obdobje v letu je najprimernejše za SAR opazovanja?
- V kolikšni meri je tehnika DInSAR uporabna za spremljanje premikov na območju z gosto vegetacijo?

Glede na rabo tal lahko na območju Slovenije – oziroma območju s podobnimi lastnostmi – med dvema podobama SAR, posnetima s časovnim razmikom 12 dni pričakujemo naslednjo koherenco:

- gozd: v času od aprila do oktobra do 0,2, od novembra do marca pa višje vrednosti, a praviloma ne višje od 0,3;
- njiva ali vrt: v času od aprila do oktobra vrednosti med 0,2 in 0,3 z najnižjimi vrednostmi v času julija in avgusta, od novembra do marca pa izrazito visoke vrednosti, tudi do 0,7, z močno odvisnostjo od vremenskih pogojev, ki lahko povzročijo izrazit padec koherence;
- pozidano in sorodno zemljišče: skozi celo leto med 0,4 in 0,6, v času zime brez snega lahko tudi višje vrednosti.

Navedene vrednosti so predvsem v času med novembrom in marcem močno pogojene z vremenskimi pojavi.

Ugotavljamo, da je tako pri vsaki rabi posebej kot na celotnem območju z mešanimi rabami najboljša koherenca v času od novembra do marca. V tem času se lahko srednja vrednost koherence interferogramov zaporednih preletov dvigne do vrednosti 0,49 (v času naših opazovanj) oziroma predvidoma tudi višje. Visoko koherenco v tem časovnem obdobju, za katerega je značilno golo drevje in mirujoča vegetacija, izrazito znižajo snežne padavine. Tako je smiselno uporabiti posnetke iz obdobja pozne jeseni, ko drevje ni več zeleno, prav tako pa še ni snega, ali iz obdobja zgodnje pomladi, ko ni več snega in se vegetacija še ni prebudila. Obdobje najbolj koherentnih zaporednih posnetkov se torej vsako leto spreminja glede na vreme, smiselno pa je upoštevati navedene smernice. Le-te za povprečnega uporabnika SAR podatkov zadostujejo, zanimivo pa bi bilo podrobneje raziskati nihanje vrednosti koherence glede na posamične vremenske pogoje, kot je višina snežne odeje, količina snega, morda celo toča in podobno.

Ugotovili smo, da tehnika diferencialne interferometrije z uporabo podatkov Sentinel-1, kot so na voljo danes, ni primerna za spremljanje premikov na območju z visoko vegetacijo. Glede na naše rezultate je uporabna za spremljanje posedanja urbanih območij, kjer lahko poda splošne lastnosti gibanja nekega območja, ne pa še točnejših rezultatov. DInSAR je sicer kot tehnika primerna za spremljanje premikov površin in ne posamičnih točk. V tem oziru so naši rezultati pričakovani.

Ko bo postal operativen še drugi satelit konstelacije Sentinel-1, Sentinel-1B, bomo imeli na voljo podobe SAR na vsakih 6 dni. Takrat bi bilo smiselno ponoviti postopek te naloge in primerjati rezultate. Obetamo si lahko večjo koherenco, boljše razvijanje faze in nasploh uporabnejše rezultate.

Sicer je naslednji smiseln korak uporaba permanentnih sipalcev, ki lahko obidejo vpliv atmosfere na vrednost faze. 6 dni časa ponovnega preleta, ko bosta obratovala oba Sentinel-1, pomeni večje število permanentnih sipalcev in boljšo eliminacijo vpliva atmosfere na fazo.

Najbolj problematičen korak v procesiranju je gotovo razvijanje faze. Pripisujemo mu del razlogov za slabosti rezultatov. Na razvijanje vplivata tako vrednost koherence, ki je na našem območju razmeroma nizka, kot tudi algoritem za razvijanje faze, ki še ni do te mere optimiziran, da bi se na rezultate lahko zanašali. Pričakujemo, da se bo skupaj z razvojem SAR tehnologije in razvojem diferencialne interferometrije izboljšal tudi postopek razvijanja faze. Glede na naše rezultate je težko oceniti, kolikšen vpliv na rezultate je imel vpliv atmosfere, kolikšen pa uspešnost razvijanja faze. Zanimivo bi se bilo bolj poglobiti v to temo.

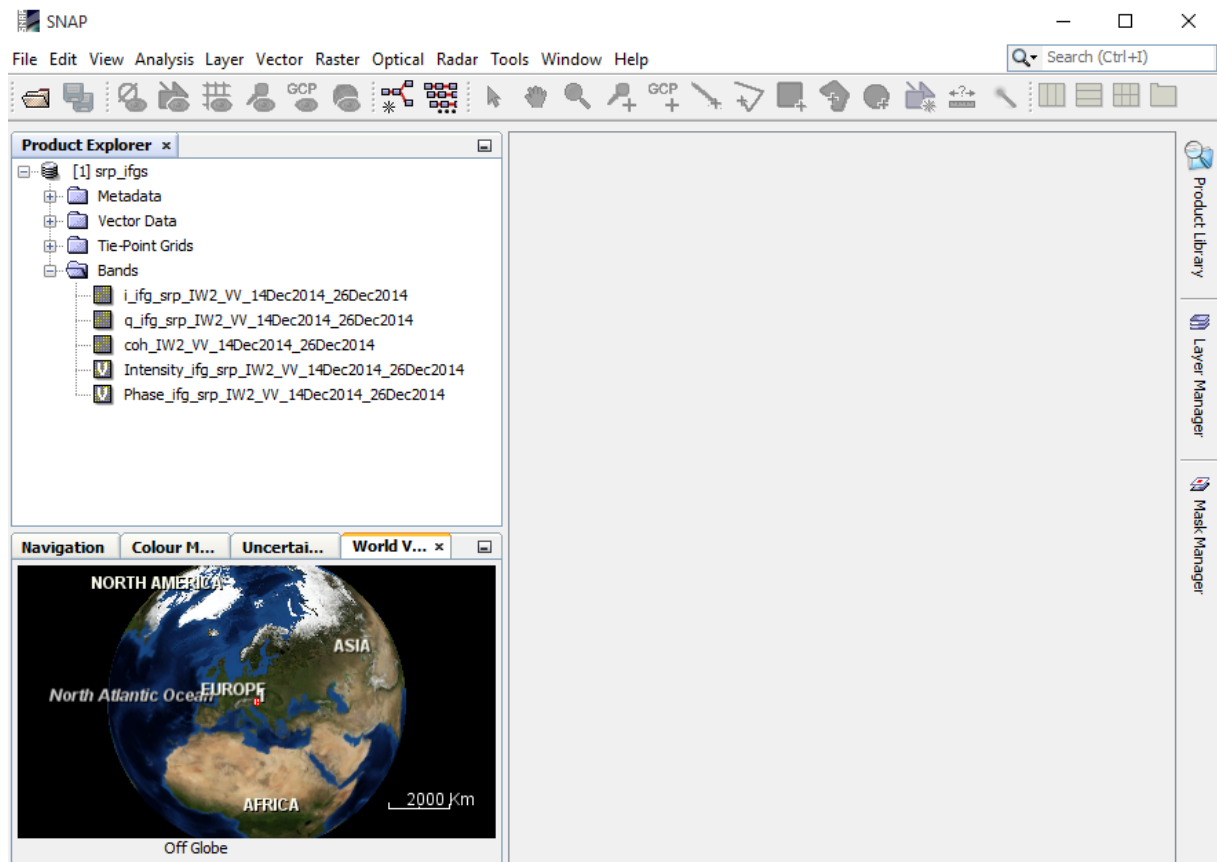
Ta magistrska naloga je načela kar nekaj zanimivih vprašanj, ki bi se jih dalo podrobneje raziskati. Glede na to, da so podatki razmeroma novi, nova pa je tudi programska oprema, tehnologija SAR z vsemi svojimi metodami pa je tudi v polnem razvoju, je nekakšen odprt zaključek naloge pričakovan. Rezultati te magistrske naloge naj služijo tistim, ki se bodo, tako kot smo se mi, v prihodnje odločili za uporabo podatkov Sentinel-1 za radarsko interferometrijo in bodo po branju te naloge imeli za svoje delo boljše izhodišče.

## PRILOGA A: POSTOPEK OBDELAVE PO KORAKIH

V nalogi smo uporabili več programskih okolij. Za interferometrično obdelavo SAR podatkov smo uporabili predvsem S1TBX in Snap. Srednjo vrednost koherence glede na rabo tal in diferencialni interferogram smo izračunali v QGIS-u. Primerjavo rezultatov in njen prikaz smo opravili v Excelu.

S1TBX je predhodnik Snapa in je namenjen zgolj obdelavi podatkov, pridobljenih s Sentinelom-1. Mogoče ga je namestiti na računalnik, a zanj ne bo več posodobitev. V Snapu bodo v prihodnosti združeni moduli za obdelavo vseh Sentinelovih podatkov. Stalno ga posodabljujejo in popravljajo napake, je pa za nekatere reči še vedno boljše delujoč S1TBX. V času izdelave te naloge je bilo smiselno kombinirati oba programa in tako obiti začetne slabosti novega Snapa. V prihodnosti lahko pričakujemo, da bo Snap povsem nadomestil stare programe in da ga ne bo več potrebno dopolnjevati s prejšnjimi verzijami. V sami uporabi in funkcijah sta si Snap in S1TBX enaka. Koraki obdelave, zapisani v tem poglavju, torej veljajo za oba programa. Razlikujejo se lahko kvečjemu minimalno in so v takem primeru zapisani za Snap.

Za oba programa je značilno, da ima v postopku obdelave nastavljene predpostavljene vrednosti parametrov. Kjer ni v postopku posebej omenjeno, da smo te vrednosti spreminjali, so ostale predpostavljene.



Slika 47: Osnovni pogled v programu Snap.

QGIS in Excel sta uveljavljena programa, zato se zelo podrobno v njuno uporabo v tem poglavju nismo spuščali.

Na sliki 48 je prikazan osnovni pogled v programu Snap. V okencu Product Explorer si lahko pogledamo vse podatke o podobi SAR, ki je odprta v Snapu. V podmapi Bands vidimo vse kanale, ki so na voljo za pregled in procesiranje. V okencu World View, ki ga lahko zapremo in ponovno prikličemo preko View → Tool Windows → World View, je prikazan položaj izbrane podobe SAR (cele podobe, podpasa ali izrezanega območja) na karti sveta.

### A.1 Izdelava interferograma in izračun srednje vrednosti koherence

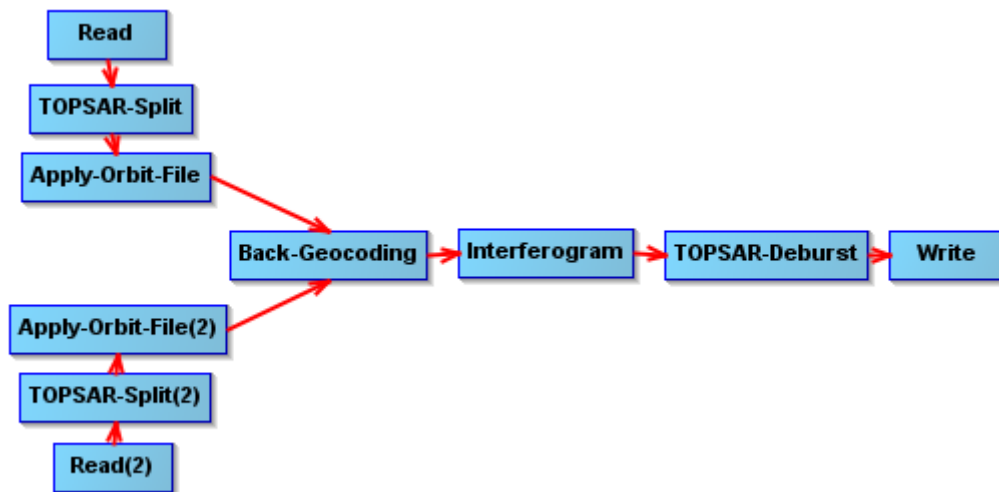
V Snapu izvedemo naslednje korake:

1. File → Open product: odpre podobo SAR. To ponovimo še z drugo podobo.
2. Radar → Sentinel-1 TOPS → S-1 TOPS Split: podobo vertikalno razreže na tri podpasove in ohrani tistega, ki ga izberemo (IW1, IW2 ali IW3) z izbrano polarizacijo. Kateri podpas je pravi, ugibamo glede na položaj izbranega območja na območju podobe SAR. Razdelitev podobe SAR na podpase je prikazana na sliki 22.
3. Radar → Apply Orbit File: posodobi tirnice podobe SAR s preciznimi tirnicami. Če je uporabljena podoba SAR pridobljena v bližnji preteklosti, precizne tirnice lahko še niso dostopne.
4. Radar → Coregistration → S1 TOPS Coregistration → S-1 Back Geocoding: dve podobi SAR (nadrejena in podrejena) istega podpasu in polarizacije sta s tem ukazom koregistrirani. Podobo SAR, ki je bomo najprej navedli, bo program privzel za nadrejeno.

Za spremljanje premikov na območjih, ki nimajo najboljše koherence, potrebujemo dva interferograma treh zaporednih preletov, pri čemer mora biti ena podoba drugima dvema nadrejena, zato je najbolje, če pri treh zaporednih preletih uporabimo drugo podobo za nadrejeno, prvo in tretjo pa za podrejene. V Snapu bo nadrejena podoba tista, ki jo izberemo prvo v postopku koregistracije.

5. Radar → Interferometric → Products → Interferogram formation: izdela iz koregistriranih podob SAR interferogram.
6. Radar → Sentinel-1 TOPS → S-1 TOPS Deburst: združi dele interferograma v enotno podobo, ki jo je mogoče nadalje obdelati.

Ker je korakov v obdelavi veliko in trajajo različno dolgo, je smiselno opraviti paketno obdelavo, ki jo omogoča Snap. To storimo tako, da uporabimo orodje Graph Builder in v njem ustvarimo postopek, ki bo opravil potrebno, shranil pa samo zadnjo verzijo in ne vmesnih, razen, če mu to naročimo, kar je glede na velikost podatkov zelo koristno. Algoritem je prikazan na sliki 47 – cel postopek je po tem, ko smo ga zagnali, trajal 40 do 200 minut. Na ta način je mogoče opraviti večino postopkov v enem koraku. So pa naslednji koraki po navadi bistveno krajši (dolžina je odvisna od tega, kako veliko območje si izberemo za nadaljnjo obdelavo), predvsem pa ni vsak računalnik sposoben procesirati vsega v eni potezi. Razvijanje faze v Snapu ni mogoče in je potrebno uporabiti drug program. Zato smo v tej nalogi uporabili paketno procesiranje Graph Builderja le do tu, nadaljevali pa smo ročno, z vsakim (krajšim) korakom posebej.



Slika 48: Graf v Graph Builderju programa Snap – od začetka procesiranja pa do interferograma, pripravljenega na obrez.

7. Raster → Subset: Za časovno manj potratno obdelavo podatkov in boljši sproti pregled nad potekom dela s tem korakom obrežemo interferogram na naše zelene območje. Mi smo uporabili prostorski obrez z geografskimi koordinatami, ki ob več podobah najbolj zagotavlja obrez na isto območje.
8. V Product Explorerju odpremo mapo Bands. Tam levo kliknemo na kanal koherenca (coh\_...). Nato pa Analysis → Statistics in pritisnemo gumb Refresh za izračun statistike – poda nam minimum, maksimum, srednjo vrednost, standardni odklon, mediano. Zelene podatke izpišemo v tabelo in jih obdelamo.

Za izračun srednje vrednosti koherence na območju rabe je bilo potrebno uporabiti QGIS, saj Snap ne omogoča vseh GIS analiz, ki so potrebne za pridobitev te informacije:

1. Layer → Add Layer → Add Vector Layer: sloj rabe tal uvozimo v program. Ob uvozu podatkov MKGP je potrebno izbrati koordinatni sistem MGI 1901 / Slovene National Grid.
2. Vector → Geoprocessing Tools → Clip: sloj rabe tal obrežemo s poligonom, ki ga moramo predhodno ustvariti glede na testno območje, ki nas zanima.
3. Vector → Data Management Tools → Split Vector Layer: Poligone posamezne rabe po atributu RABA\_ID shranimo v samostojne sloje.
4. Vector → Geometry Tools → Singleparts to Multipart: poligone znotraj posamezne rabe tal združimo v en poligon z več deli.
5. Layer → Add Layer → Add Raster Layer: uvozimo raster koherence, ki ga najdemo v mapi poleg ostalih podatkov interferograma. Ob uvozu je potrebno izbrati koordinatni WGS 84.
6. Najlažje bomo nadaljevali, če pretvorimo sloje rabe tal v koordinatni sistem koherence tako, da sloj ponovno shranimo v drugem koordinatnem sistemu (Layer → Save As ...).
7. Raster → Zonal Statistics → Zonal Statistics: izračunamo srednjo vrednost koherence pod vektorskim slojem posamezne rabe. Srednja vrednost se bo pojavila kot zadnji atribut v atributni tabeli sloja posamezne rabe.



Ta postopek ponovimo za vse podatke, za katere nas zanima srednja vrednost koherence oziroma za vse interferometrične pare, ki jih potrebujemo za spremljanje premikov. Za vse podatke torej izračunamo interferogram med zaporednimi posnetki in izpišemo srednjo vrednost koherence za celotno podobo in še po izbranih rabah, podatke uredimo v tabeli in jih prikažemo v grafu.

## A.2 Od interferograma do razvijanja faze

Potem, ko smo izvedli vse korake točke v programu Snap, izberemo dva interferograma treh zaporednih preletov (s skupno nadrejeno podobo) z najboljšo koherenco in nadaljujemo postopek, ki nas bo predvidoma pripeljal do premikov.

1. Radar → Interferometric → Filtering → Goldstein Phase Filtering: postopek, ki ga je dobro odpraviti pred razvijanjem faze, saj zmanjša odstopanja faze in izboljša natančnost naslednjega koraka, razvijanja faze.
2. Radar → Multilooking: Pred razvijanjem faze lahko po želji uporabimo večkratne poglede.
3. Radar → Interferometric → Unwrapping → Snaphu Export: priprava in izvoz podatkov v obliki, ki je kompatibilna s programom Snaphu, v katerem opravimo razvijanje faze.
4. Razvijanje faze v programu Snaphu.

Orodja za razvijanje faze v Snapu ni na voljo, oziroma je predvideno, da bomo za to uporabili drugo orodje. Ko je interferogram pripravljen na razvijanje faze, ga izvozimo in po razvijanju faze nazaj uvozimo. Postopek uporabe programa Snaphu za razvijanje faze, vključno z namestitvijo virtualnega operacijskega sistema Linux, v katerem Snaphu teče, je temeljito opisan v Tutorialu za SAR interferometrijo (Veci, 2015).

5. Radar → Interferometric → Unwrapping → Snaphu Import: uvoz interferograma, skupaj z razvito fazo nazaj v Snap.
6. Radar → Geometric → Terrain Correction → Range-Doppler Terrain Correction: Izvede georeferenciranje podobe in odpravi popačene razdalje, ki so v podobi SAR prisotne zaradi nagiba satelita in topografske raznolikosti opazovanega območja. Popravek terena lahko opravimo tudi že prej v postopku.
7. Korake ponovimo za oba interferograma treh zaporednih preletov.

## A.3. Izračun premikov

Naslednji koraki so rastrske operacije in jih izvajamo v programu QGIS:

1. Najprej je potrebno v QGIS uvoziti naslednje rastrske sloje:
  - razvito fazo prvega interferograma (2. prelet - nadrejena podoba in 1. prelet – podrejena podoba),
  - razvito fazo drugega interferograma (2. prelet – nadrejena podoba in 3. prelet – podrejena podoba),
  - rastra koherenc obeh interferogramov.

2. Raster → Raster Calculator: po enačbi za izračun premikov iz poglavja 2.3.2 (Zebker, 1994) izračunamo diferencialni interferogram. Vnesti je potrebno tudi pravokotno osnovno razdaljo obeh interferogramov. Kakšna je, ugotovimo na sledeč način:
  - V Snap uvozimo tisti podobi SAR, za kateri nas zanima pravokotna osnovna razdalja. Podobi SAR naj bosta v tisti, za nas »surovi« obliki, kot smo ju pridobili iz SSDH (SLC).
  - Radar → Interferometric → InSAR Stack Overview. Kliknemo Add Opened in Overview. V razdelku Bperp bomo dobili pravokotno osnovno razdaljo. V razdelku Mst/Slv se nahaja informacija, za katero podobo Snap predpostavlja, da bo nadrejena in za katero, da bo podrejena. Če predpostavlja obratno, kot smo mi izbrali nadrejeno/podrejeno podobo (prva, ki je izbrana, je bila za nas nadrejena), je potrebno pri pravokotni osnovni razdalji upoštevati spremembo predznaka.
3. Vrednost zamika smo odpravili tako, da smo preprosto odšteli diferencialnemu interferogramu njegovo vrednost in prišteli premik v rastrski celici na mestu zanesljive izbrane točke GNSS mreže.

## **PRILOGA B: KOMENTAR NA UPORABLJENO PROGRAMSKO OPREMO**

Več orodij v Snapu je še nezanesljivih. Med njih spada na primer uporaba Subseta v Graph Builderju, prikaz območja v World View in še nekaj drugih. Pričakujemo lahko, da bodo te težave v prihodnjih verzijah odpravljene. Dokler pa so še prisotne, lahko uporabniku povzroči veliko preglavic iskanje svoje napake, preden se zave, da je napaka pravzaprav v programu in ne v njegovem ravnanju.

Nekatera orodja v Snapu so predvidena, a jih avtorji še niso vključili v program. Za nas je najbolj zanimivo takšno orodje Three-Pass DInSAR, ki bo olajšal procesiranje podatkov in omogočil izdelavo diferencialnega interferograma v okviru Snapa, kar zdaj ni mogoče.

Snap ima še veliko začetniških muh, ki povzročajo probleme in lahko zelo zavlečejo celoten postopek. Trenutno je za nekatere korake obdelave smiselno uporabiti S1TBX, predhodnik Snapa.

Pomembna je tudi hitrost obdelave, predvsem pri veliki količini vhodnih podatkov. Snap je napisan v javi in je podedoval vse njene slabosti, vključno s požrešnostjo glede pomnilnika. Pri posnetkih velikosti več GB je obdelava zato lahko zelo počasna, pogosto pa pride tudi do pomanjkanja pomnilnika.

V primeru težav pri uporabi Snapa, se je koristno obrniti na naslednje vire:

- navodila za uporabo S1TBX oziroma Snapa na spletni strani: <http://step.esa.int/main/doc/tutorials/sentinel-1-toolbox-tutorials/> oziroma na druga navodila, ki bodo v tistem trenutku na voljo,
- pomoč uporabnikom Help, ki je na voljo znotraj programa Snap,
- forum uporabnikov Snapa na naslovu: <http://forum.step.esa.int/c/snap>.

## VIRI

- Airbus Defence & Space. 2016. [http://www2.geo-airbusds.com/files/pmedia/public/r463\\_9\\_itd-0508-cd-0001-tsx\\_international\\_pricelist\\_en\\_issue\\_6.00.pdf](http://www2.geo-airbusds.com/files/pmedia/public/r463_9_itd-0508-cd-0001-tsx_international_pricelist_en_issue_6.00.pdf) (Pridobljeno 10. 1. 2016.)
- Amin, A., Bankher, K. 1997. Causes of Land Subsidence in the Kingdom of Saudi Arabia. *Natural Hazards* 16, 57-63.
- ARSO. 2015. Agencija Republike Slovenije za okolje: <http://meteo.arso.gov.si/> (Pridobljeno 20. 12. 2015.)
- ASF. 2016. Alaska Satellite Facility. <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/insar/#prettyPhoto> (Pridobljeno 2. 2. 2016.)
- Chen, C.W., Zebker, H.A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A* 17, 401-414.
- Chen, C.W., Zebker, H.A. 2001. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A* 18, 338-351.
- Chen, C.W., Zebker, H.A. 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *Geoscience and Remote Sensing* 40, 1709-1719.
- Cheng, X., Xu, G. 2006. The integration of JERS-1 and ERS SAR in differential interferometry for measurement of complex glacier motion. *Journal of Glaciology* 52, 176: 80-88.
- Crisp. 2016. Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing. <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/freqpol.htm> (Pridobljeno 15. 1. 2016.)
- e-GEOS. 2016. <http://www.e-geos.it/products/pdf/prices.pdf> (Pridobljeno 10. 1. 2016.)
- Eineder, M., Holzner, J. 1999. Phase unwrapping of low coherence differential interferograms. V: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg*, 28. 6. 1999 – 2. 7. 1999. IEEE: p. 1727-1730.
- Esa. 2016a. European Space Agency. [http://www.esa.int/About\\_Us/Welcome\\_to\\_ESA/What\\_is\\_ESA](http://www.esa.int/About_Us/Welcome_to_ESA/What_is_ESA) (Pridobljeno 3. 1. 2016.)
- Esa. 2016b. European Space Agency. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview3](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3) (Pridobljeno 11. 1. 2016.)
- Esa. 2016c. European Space Agency. [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa\\_Valley\\_earthquake](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Napa_Valley_earthquake) (Pridobljeno 9. 1. 2016.)

Esa. 2016d. European Space Agency.

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/Satellite\\_frequency\\_bands](http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands) (Pridobljeno 10. 1. 2016.)

Esa. 2016e. European Space Agency. [https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset\\_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter](https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter) (Pridobljeno 12. 1. 2016.)

Esa. 2016f. European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (Pridobljeno 31. 1. 2016.)

Esa. 2016f. European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> (Pridobljeno 31. 1. 2016.)

Esa. 2016g. European Space Agency. [https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux\\_poeorb/](https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux_poeorb/) (Pridobljeno 10. 2. 2016.)

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Noordwijk, ESA Publications: 119 str.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 8-20.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. 1999. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: The wavelet approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 37, 705-715.

Ge, L., Chang, H.-C., Rizos, C. 2007. Mine Subsidence Monitoring Using Multi-source Satellite SAR Images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 3, 259-266.

Gens, R. 1998. Quality assessment of SAR interferometric data. Doktorska disertacija. Hannover, Der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover (samozaložba R. Gens).

Gens, R. 2003. Two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry: Developments and new challenges. International Journal of Remote Sensing 24, 703-710.

Goldstein, R.M., Werner, C.L. 1998. Radar Interferogram Phase Filtering for Geophysical Applications. Geophysical Research Letters 12, 4035-4038.

Hasanuddin, Z.A., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., Gamal, M. 2007. Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GNSS surveys. GNSS solutions 12, 23-32.

Rojko, I. 2016. Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja. Mag. d. Ljubljana, UL FGG, Magistrski študijski program Geodezija in geoinformatika.

---

Holzer, T.L. 1976. Ground failure in areas of subsidence due to ground-water decline in the United States. V: Publication n°121 of the International Association of Hydrological Sciences: Proceedings of the Anaheim Symposium, December 1976, pp: 423-433.

Joughin, I.R., Winebrenner, D.P., Fahnestock, M.A. 1995. Observations of ice-sheet motion in Greenland using satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 22, 571-574.

Memarsadeghi, N., Rincon, R. 2013. NASA Computational Case Study: SAR Data Processing – Ground-Range Projection. *Computing in Science & Engineering* 15, 6, 92-95.

MKGP. 2016a. Ministrstvo za kmetijstvo, gospodarstvo in prehrano. <http://rkg.gov.si/GERK/> (Pridobljeno 28. 1. 2016.)

MKGP. 2016b. Ministrstvo za kmetijstvo, gospodarstvo in prehrano. Interpretacijski ključ: Podroben opis metodologije zajema dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. [http://rkg.gov.si/GERK/documents/RABA\\_IntKljuc.pdf](http://rkg.gov.si/GERK/documents/RABA_IntKljuc.pdf) (Pridobljeno 28. 1. 2016.)

Mora, O., Mallorquí, J.J., Duro, J., Broquetas, A. 2001. Long-term subsidence monitoring of urban areas using differential interferometric SAR techniques. V: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, 9. 7. 2001 – 13. 7. 2001. IEEE: p. 1104-1106.

NASA. 2016. National Aeronautics and Space Administration. [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt\\_passive\\_active.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html) (Pridobljeno 15. 1. 2016.)

NRCan. 2015. Natural Resources Canada. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9325> (Pridobljeno 22. 11. 2015)

Oštir, K. 2000. Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov višin in premikov zemeljskega površja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Oštir): 175 str.

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU: 250 str.

Oštir, K., Komac, M. 2007. PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations – A case of NW Slovenia. *Geologija* 50, 77-96.

Pierdicca, N., Rocca, F., Basili, P., Bonafoni, S., Cimini, D., Ciotti, P., Ferretti, R., Foster, W., Marzano, F.S., Mattioli, V., Montopoli, M., Notarpietro, R., Padmanabhan, S., Perissin, D., Pichelli, E., Reising, S., Sahoo, S., Venuti, G. 2009. Atmospheric water-vapour effects on spaceborne Interferometric SAR imaging: data synergy and comparison with ground-based measurements and meteorological model simulations at urban scale. V: *3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, 23. 3. 2007 – 27. 3. 2007. IEEE: p. 3443-3447.

- Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A. 1992. SAR interferometry experiments with ERS-1. V: Proceedings 1st ERS-1 Symposium, Cannes, France, 4. 11. 1992 – 6. 11. 1992. p. 211-218.
- Reigber, A., Scheiber, R. 2003. Airborne Differential SAR Interferometry: First Results at L-Band. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 1516-1520.
- Remy, D., Bonvalot, S., Briole, P., Mukarami, M. 2003. Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan). Earth and Planetary Science Letters 213, 299–310.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Fuk, K.L., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M. 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE 88, 333-385.
- Rott, H. 2009. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science. Progress in Physical Geography 33, 769-791.
- RSDE. 2016. Remote Sensing for Digital Earth. <https://rsde.fbk.eu/research/synthetic-aperture-radar-SAR> (Pridobljeno 15. 1. 2016.)
- Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A.M., Rocca, F. 2012. Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. Remote Sensing of Environment 120, 156-163.
- Schwäbisch, M., Winter, R. 1995. Erzeugung digitaler Geländemodelle mit Methoden der SAR-Interferometrie. DLR-Nachrichten 79, 20-24.
- Soergel, U., Thoennessen, U., Stilla, U. 2003. Visibility analysis of man-made objects in SAR images. V: 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Berlin, 22. 5. 2003 – 23. 5. 2003. IEEE: p. 120-124.
- Strozzi, T., Wegmüller, U. 1999. Land subsidence in Mexico City mapped by ERS differential SAR interferometry. V: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 28. 6. 1999 – 2. 7. 1999. IEEE: p. 1940-1942.
- Sykioti, O., Kontoes, C.C., Elias, P., Briole, P., Sachpazi, M. 2003. Ground deformation at Nisyros volcano (Greece) detected by ERS-2 SAR differential interferometry. International Journal of Remote Sensing 24, 183-188.
- SSDH. 2015. Sentinels Scientific Data Hub. <https://scihub.copernicus.eu/> (Pridobljeno 1. 10. 2015 – 20. 1. 2016)
- UNAVCO. 2015. University NAVSTAR Consortium. <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html> (Pridobljeno 22. 11. 2015.)

Rojko, I. 2016. Uporaba diferencialne radarske interferometrije za opazovanje premikov površja. Mag. d. Ljubljana, UL FGG, Magistrski študijski program Geodezija in geoinformatika.

---

Veci, L. 2015. Sentinel-1 Toolbox Interferometry Tutorial.

<http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf> (Pridobljeno 10. 10. 2015.)

Walter, D., Wegmüller, U., Spreckels, V., Hannemann, W., Busch, W. 2009. Interferometric monitoring of an active underground mining field with high-resolution SAR sensors. V: ISPRS Hannover Workshop 2009: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, 2. 6. 2009 – 5. 6. 2009.

Zebker, H.A. 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research* 102, 7547-7563.

Zebker, H.A., Rosen, P.A., Goldstein, R., M., Gabriel, A., Werner, C.L. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99, 19617-19634.

Zebker, H.A., Villasenor, J. 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30, 950–959.