



РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ШКОЛА ЗА ДОКТОРСКИ СТУДИИ

Број _____
Датум _____ 20 ____ година
Скопје

До
Советот на студиската програма по ГЕОДЕЗИЈА

Република Северна Македонија
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ
СКОПЈЕ

019Б-ДДТ

Примено: 04-19-2025			
Орг. Едини.	Број:	Прилог:	Вредност:
08/	136-6		

ДОСТАВУВАЊЕ НА ДОКТОРСКИОТ ТРУД

Име и презиме	Томе Геговски
Број на индекс	57
Студиска програма	Геодезија
Година на упис на докторски студии	2021/2022 г.
Наслов на темата (на македонски и на англиски јазик)	Напредни <i>InSAR</i> техники за следење на деформации на Земјината кора <i>Advanced InSAR Techniques for Monitoring Earth's Crustal Deformations</i>

За да поднесе докторски труд, студентот потребно е да ги исполнува следниве услови:

- стекнати 154 ЕКТС - кредити;
- доставен труд во електронска форма и 7 (седум) еднообразни примероци во печатена форма;
- 2 (два) труда објавени во референтни научни публикации;
- доказ за докторските студии од областа на уметностите.

Јас, проф. д-р Златко Богдановски, како ментор, потврдувам дека студентот ги исполнува условите за да поднесе готов докторски труд и предлагам трудот да се стави во понатамошна постапка и да се формира Комисија за одбрана.

Студент

Ментор



УНИВЕРЗИТЕТ “СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ”
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ



Томе Ефте Геговски

**НАПРЕДНИ INSAR ТЕХНИКИ ЗА СЛЕДЕЊЕ НА
ДЕФОРМАЦИИ НА ЗЕМЈИНАТА КОРА**

Докторски труд

Скопје, 2025 год.



УНИВЕРЗИТЕТ "СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ"
ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ - СКОПЈЕ
СТУДИСКА ПРОГРАМА ПО ГЕОДЕЗИЈА



Томе Ефте Геговски

**НАПРЕДНИ INSAR ТЕХНИКИ ЗА СЛЕДЕЊЕ НА
ДЕФОРМАЦИИ НА ЗЕМЈИНАТА КОРА**

Докторски труд

Скопје, 2025 год.

Докторанд:

Томе Ефте Геговски

Наслов на темата на докторскиот труд:

Напредни *InSAR* техники за следење на деформации на Земјината кора

НАСЛОВ НА ТЕМАТА НА ДОКТОРСКИОТ ТРУД:

НАПРЕДНИ *InSAR* ТЕХНИКИ ЗА СЛЕДЕЊЕ НА ДЕФОРМАЦИИ НА ЗЕМЈИНАТА КОРА

Ментор:

Проф.д-р ЗЛАТКО БОГДАНОВСКИ,

Градежен факултет – Скопје

Комисија за одбрана:

Научна област: ГЕОДЕЗИЈА

Датум на одбрана:

НАПРЕДНИ *INSAR* ТЕХНИКИ ЗА СЛЕДЕЊЕ НА ДЕФОРМАЦИИ НА ЗЕМЈИНАТА КОРА

- А П С Т Р А К Т -

Сè поголемите барања за прецизно и континуирано следење на Земјините деформации на глобално и локално ниво ја наметнуваат потребата од примена на нови технологии кои овозможуваат детална просторна и временска анализа на поместувањата. Во оваа насока, сателитската радарска интерферометријата (*InSAR*) претставува современ пристап за мониторинг на деформации со висока точност кој може да се применува на глобално и локално ниво. Целта на ова истражување е да се процени точноста, сигурноста и применливоста на напредните *InSAR* техники за следење на деформациони процеси во различни просторни услови. Истражувањето опфаќа три студии на случај со различен карактер и намена, како урбаната зона на Скопската Котлина, Полошката Котлина и нејзиното околно рурално-планинското подрачје и континуиран мониторинг на насипната брана Лисиче. При анализите, за сите трите студии на случај се искористени сите достапни *Sentinel-1 SLC* снимки (*C-band*, во растечка и опаѓачка орбита) и 82 *TerraSAR-X* снимки (*X-band*, во растечка орбита) за подрачјето на Скопската Котлина. Обработката е спроведена во софтверот *SARPROZ* со комбинирана примена на *Persistent Scatterer (PS)* и *Distributed Scatterer (DS)* пристапите. Резултатите за урбаната зона на Скопската Котлина укажуваат на генерално стабилна состојба на ова подрачје, со издвоена локализирана деформациска зона во населбата Припор, каде се детектирани комбинирани вертикални и хоризонтални поместувања, со логична насока согласно морфолошките карактеристики на подрачјето. Идентичните резултати на деформациските трендови добиени од независните анализи со *Sentinel-1* и *TerraSAR-X* снимките дополнително ја потврдуваат сигурноста на забележаните брзини на поместување. Во Полошката Котлина не се забележани значајни поместувања на котлинското дно, но на падините на Шар Планина кај селата Селце и Раковец се евидентирани локализирани поместувања чии насоки содејствуваат со морфологијата на тие површини. Анализата на насипната брана Лисиче покажа висока согласност помеѓу *InSAR* резултатите и геодетските мерења, потврдувајќи ја доверливоста на *InSAR* методологијата при следење на инженерски објекти и нејзиниот потенцијал како дополнителна компонента во системите за техничко набљудување на вакви конструкции. Врз основа на добиените резултати, се препорачува воспоставување на редовен геодетски мониторинг во идентификуваните критични подрачја, во населбата Припор и селата Селце и Раковец со цел потврда на забележаните *InSAR* наоди. Дополнително, се предлага институционализирање на *InSAR* методологијата како дел од националниот систем за следење на геодинамички процеси на територијата на целата држава и вклучување на оваа метода за континуирано следење на капиталните објекти во државата.

Клучни зборови: *InSAR*, мониторинг на деформации, *PSInSAR*, *QPSInSAR*, *Sentinel - 1*, *TerraSAR - X*.

ADVANCED INSAR TECHNIQUES FOR MONITORING EARTH'S CRUSTAL DEFORMATION

- A B S T R A C T -

The increasing demand for accurate and continuous observation of Earth surface deformations, both on a global and local scale, emphasizes the need for advanced technologies capable of providing detailed spatial and temporal analyses of ground movements. In this regard, satellite radar interferometry (InSAR) represents a modern and highly efficient approach for monitoring surface deformation over large areas with high precision. This research aims to evaluate the accuracy, reliability, and applicability of advanced InSAR techniques for monitoring deformation processes under different environmental and spatial conditions. The study focuses on three case studies of distinct characteristics and purpose: the urban area of the Skopje Basin, the Polog Basin with its surrounding rural and mountainous terrain, and the continuous monitoring of the Lisice embankment dam. All available Sentinel-1 SLC images (C-band, ascending and descending orbits) and 82 TerraSAR-X images (X-band, ascending orbit) were used for the analyses. Data processing was performed using SARPROZ software through a combined application of the Persistent Scatterer (PS) and Distributed Scatterer (DS) approaches. Results for the Skopje Basin indicate a generally stable condition, with a localized deformation zone identified in the Pripor neighborhood, where combined vertical and horizontal displacements were detected, consistent with the local morphology. The similar deformation trends obtained independently from Sentinel-1 and TerraSAR-X datasets further confirm the reliability of the observed displacement rates. In the Polog Basin, no significant ground movements were identified on the valley floor, although localized displacements were detected on the slopes of Sar Planina near the villages of Selce and Rakovec, aligned with the natural terrain configuration. The analysis of the Lisice Dam revealed strong agreement between InSAR results and geodetic measurements, confirming the robustness of the InSAR methodology for engineering structure monitoring and its potential integration into technical surveillance systems. Based on these findings, it is recommended to establish regular geodetic monitoring in the identified critical zones, Pripor, Selce, and Rakovec, to validate the InSAR observations. Furthermore, the study suggests institutional integration of InSAR techniques within the national system for geodynamic monitoring, as well as their inclusion in the continuous observation of key infrastructure facilities across the country.

Key words: InSAR, deformation monitoring, PSInSAR, QPSInSAR, Sentinel-1, TerraSAR-X.

Искрено ја изразувам својата благодарност до мојот ментор, проф. д-р Златко Богдановски, чија визија и иницијална идеја истисражувањето да биде насочено кон InSAR проблематиката ја поставија насоката и темелите на овој труд. Неговата доверба и стручна поддршка беа важен елемент во изработката на дисертацијата.

Искрена благодарност изразувам и до проф. Daniele Perissin од Универзитетот во Падова (Università degli Studi di Padova), Италија, за можноста да го користам софтверот SARPROZ, како и за неговата професионална поддршка и насоки во обработката на InSAR податоциите.

Поседна благодарност укажувам до Alfredo Rocca, доктор на науки во областа на InSAR и директор во компанијата EO59, за неговата стручна поддршка, корисни совети и инспиративни дискусии во текот на спроведувањето на истисражувањата.

Благодарност укажувам и до професорите и колегите од катедрите за геодезија при Градежниот факултет во Скопје, за нивната поддршка, соработка и разбирање во текот на изработката на дисертацијата.

Најискрена и најдлабока благодарност им должам на моето семејство за нивната безрезервна поддршка, охрабрување и трпение во текот на целиот процес на истисражувањата. Особена благодарност укажувам до мојата сопруга Габриела и мојот син Андреј за нивното разбирање, љубов и посветена поддршка, на кои воедно им ја посветувам оваа дисертација.

СОДРЖИНА

1.	Вовед.....	1
1.1	Преглед на научните достигнувања во областа.....	1
1.2	Предмет и цели на истражувањето.....	2
1.3	Очекуван научен придонес.....	3
1.4	Кратка содржина на трудот.....	4
2.	Теоретски основи на <i>sar</i> технологијата.....	5
2.1	Радар.....	5
2.1.1	Историски развој на радарската технологија.....	6
2.1.2	Основни карактеристики на сликовните радари.....	7
2.1.3	Просторна резолуција на радарските системи.....	9
2.2	<i>SAR (Synthetic Aperture Radar)</i>	13
2.2.1	<i>SAR</i> концепт.....	13
2.2.2	Формирање на <i>SAR</i> снимка.....	15
2.2.3	Карактеристики на <i>SAR</i> снимката.....	16
2.2.4	Дисторзии на <i>SAR</i> снимките.....	18
2.2.5	Преглед на <i>SAR</i> сателитските мисии.....	20
2.3	Физички својства на електромагнетното зрачење.....	22
2.3.1	Фреквенција и бранова должина на електромагнетните бранови.....	23
2.3.2	Амплитуда и фаза на електромагнетните бранови.....	25
2.3.3	Комплексна репрезентација на електромагнетниот повратен сигнал.....	27
2.3.4	Интерпретација на фазната компонента.....	29
2.3.5	Поларизација на електромагнетните бранови.....	31
2.3.6	Интерференција и кохерентност на електромагнетните бранови.....	32
2.3.7	Расејување на електромагнетните бранови.....	35
2.3.8	Фреквенциски опсези и интерактивни својства на електромагнетните бранови.....	38
3.	<i>SAR</i> интерферометрија.....	40
3.1	Основи на <i>SAR</i> интерферометрија.....	41
3.1.1	Формирање на интерферограм.....	41
3.1.2	Израмнување на интерферограмот (<i>interferogram flattening</i>).....	45
3.1.3	Топографска компонента во интерферометриската фаза.....	46
3.1.4	Фазно развивање (<i>phase unwrapping</i>).....	48
3.1.5	<i>InSAR</i> како фундаментална технологија за глобалните ДЕМ модели.....	50
3.2	Диференцијална интерферометрија (<i>DInSAR</i>).....	52

3.2.1	Интерпретација на деформациската компонента.....	54
3.2.2	Интерферометриска фазна кохерентност.....	55
3.2.3	Филтрирање и фазно развивање во диференцијална интерферометрија	58
3.2.4	Атмосферски ефекти.....	60
3.2.5	Атмосферска турбуленција.....	61
3.2.6	Атмосферска стратификација.....	62
3.3	Компоненти на диференцијалната интерферометриска фаза	62
3.4	Потреба од мулти-интерферограмски <i>InSAR</i> техники	63
3.5	<i>Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR)</i>	64
3.5.1	Предуслови за развој на <i>PSInSAR</i>	64
3.5.2	Основен концепт на <i>PSInSAR</i> техниката	65
3.5.3	Генерирање на диференцијални интерферограми	66
3.5.4	Селекција на перманентни расејувачи (<i>PS</i> точки).....	67
3.5.5	Локално просторно – временско моделирање	69
3.5.6	Атмосферско (<i>APS</i>) просторно – временско моделирање.....	75
3.5.7	Моделирање на сезонски ефект преку температурната компонента	82
3.5.8	Моделирање на нелинеарни поместувања	84
3.6	Моделирање на <i>InSAR</i> временски серии со дистрибуирани расејувачи (<i>DS</i>).....	86
3.6.1	<i>SBAS (Small BAseline Subset)</i> техника.....	88
3.6.2	<i>QPSInSAR (Quazi PSInSAR)</i> техника.....	89
3.7	Геометриска и математичка основа за декомпозиција на <i>InSAR</i> резултатите	91
4.	Примена на <i>InSAR</i> техники за мониторинг на деформации.....	94
4.1	Концепт и цели на применетите анализи	94
4.2	Мониторинг на деформации во урбаната зона на Скопската Котлина	96
4.2.1	Карактеристики на Скопската Котлина.....	96
4.2.2	<i>InSAR</i> анализи со <i>Sentinel-1</i> снимки на урбаната зона на Скопската Котлина.....	97
4.2.3	Декомпозиција на <i>LOS</i> поместувањата во вертикална и источно–западна компонента во рамките на нестабилната зона во населба Припор	109
4.2.4	<i>InSAR</i> анализа со <i>TerraSAR - X</i> снимки на урбаната зона на Скопската Котлина	112
4.2.5	Дискусија на резултатите од <i>InSAR</i> анализите на урбаната зона на Скопската Котлина.....	118
4.3	Мониторинг на деформации во Полошката Котлина и нејзината планинска околина	120
4.3.1	Карактеристики на Полошката Котлина и нејзината планинска околина	120
4.3.2	Користени податоци за <i>InSAR</i> анализите за Полошката Котлина и нејзината планинска околина.....	121
4.3.3	<i>InSAR</i> анализи на Полошката Котлина и нејзината планинска околина со <i>Sentinel-1</i> снимки од растечка (<i>ascending</i>) орбита.....	122

4.3.4	<i>InSAR</i> анализи на Полошката Котлина и нејзината планинска околина со <i>Sentinel-1</i> снимки од опаѓачка (<i>descending</i>) орбита.....	124
4.3.5	<i>InSAR</i> анализа на деформациските процеси во околината на село Селце	126
4.3.6	<i>InSAR</i> анализа на деформациските процеси во околината на село Раковец	135
4.3.7	Дискусија на резултатите од <i>InSAR</i> анализите на Полошката Котлина и нејзината планинска околина	143
4.4	Мониторинг на деформации на насипната брана Лисиче	146
4.4.1	Карактеристики на насипната брана Лисиче.....	146
4.4.2	<i>InSAR</i> анализи со <i>Sentinel-1</i> снимки на брана Лисиче	147
4.4.3	Декомпозиција на <i>LOS</i> поместувањата на брана Лисиче во модифицирана источно-западна и вертикална компонента	154
4.4.4	Геодетски мерења на брана Лисиче	156
4.4.5	Анализа и споредба на деформациите добиени со <i>InSAR</i> и геодетски мерења.....	160
4.4.6	Дискусија на <i>InSAR</i> резултатите и нивна валидација со геодетски мерења за брана Лисиче	165
5.	Заклучок	167
6.	Користена литература	170
7.	Прилози	178
7.1	Прилог 1 (<i>Python</i> алатка за симнување на <i>Sentinel-1 SLC</i> снимки според <i>IW</i> појас и поларизација).....	178
7.2	Прилог 2 (Положбени координати и брзини на положбени поместувања на мерните точки на брана лисиче).....	181
7.3	Прилог 3 (Надморски висини и брзини на вертикални поместувања на мерните точки на брана лисиче).....	182
7.4	Прилог 4 (Споредби на временски серии на хоризонталните поместувања определени со <i>InSAR</i> и геодетски мерења).....	183
7.5	Прилог 5 (Споредби на временски серии на вертикалните поместувања определени со <i>InSAR</i> и прецизен нивелман).....	192

ЛИСТА НА СИМБОЛИ И КРАТЕНКИ

ЛАТИНИЧНИ БУКВИ

T_x	Еминитрани микробранови пулсови
R_x	Повратни микробранови пулсови
W	Ширината на SAR антената во правец нормален на летот
L	Должина на антената во правец на летот
R	Растојание од SAR сензорот до површината на Земјата
c_0	Брзина на светлината
B_W	Фреквенциски опсег (<i>bandwidth</i>) на емитираниот пулс
L_{SA}	Должина на продолжената антена (синтетичка антена)
f	Фреквенција
A	Амплитуда
e	Ојлерова константа ($e \approx 2,71828\dots$)
E	Математичко очекување
B_n	Нормален базен вектор (нормално расетојание помеѓу точките на аквизиција)
B_t	Временски базен вектор (временски период помеѓу две аквизиции)
Δh	Висинска разлика
Δh_{amb}	Интерферометриска компонента е висинската неодреденост
d_{LOS}	Поместување во правецот на аквизиција
d_E	Декомпозиција на поместување во исток – запад насока
d_N	Декомпозиција на поместување во север – југ насока
D_A	Индекс на амплитудна дисперзија
W	Оператор за фазно модулирање
v	Брзина на поместување на PS точката во правецот на аквизиција
T_i	Регистрирана температура во i -тата аквизиција

ГРЧКИ БУКВИ

λ	Бранова должина
β_p	Аголната ширина на снопот (<i>beamwidth</i>) во <i>range</i> насока
β_{Az}	Аголната ширина на снопот (<i>beamwidth</i>) во <i>azimuth</i> насока

δ_p	Резолуција во <i>range</i> насока
δ_{Az}	Резолуција во <i>azimuth</i> насока
δ_{pGr}	Резолуција во <i>ground range</i> насока
τ	Времетраење на емитираниот пулс
θ	Агол на аквизиција
ω	Агловна фреквенција
π	Константа што ја изразува релацијата помеѓу обемот и дијаметарот на кругот ($\pi \approx 3.14159$)
Γ	Комплексната кохерентност
γ	Нормализирана кохерентност
ε_{scatt}	Расејувачки процес во рамките на резолуционата ќелија
φ	Фазна вредност
$\Delta\varphi$	Интерферометриска фазна вредност
$\varphi_{[Unw]}$	Развиена (демодулирана) фазна вредност
$\Delta\varphi_{disp}$	Интерферометриска фазна компонента сензитивна кон поместување
$\Delta\varphi_{topo}$	Интерферометриска фазна компонента сензитивна кон топографијата
$\Delta\varphi_{atmo}$	Интерферометриска фазна компонента сензитивна кон атмосферските услови
$\Delta\varphi_{noise}$	Интерферометриска фазна компонента на фазен шум
σ_A	Стандардната девијација на амплитудата на пикселот низ сите <i>SAR</i> аквизиции
μ_A	Средната вредност на амплитудата на истиот пиксел низ сите <i>SAR</i> аквизиции
α	Азимутален агол при <i>SAR</i> аквизициите

КРАТЕНКИ

<i>SAR</i>	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
<i>LOS</i>	<i>Line of Sight</i> (Правец на аквизиција)
<i>SLAR</i>	<i>Side-Looking Airborne Radar</i>
<i>SLC</i>	<i>Single Look Complex</i>
<i>InSAR</i>	<i>SAR</i> интерферометрија
<i>DInSAR</i>	Диференцијална <i>SAR</i> интерферометрија
<i>PSInSAR</i>	Диференцијална <i>SAR</i> интерферометрија со перманентни расејувачи
<i>QPSInSAR</i>	Диференцијална <i>SAR</i> интерферометрија со квази перманентни расејувачи
<i>GRD</i>	<i>Ground Range Detected</i> (тип на <i>SAR</i> снимка)
<i>OCN</i>	<i>Ocean</i> (тип на <i>SAR</i> снимка)

<i>ESA</i>	Европска вселенска агенција
<i>ESA</i>	Германска вселенска агенција
<i>X-band</i>	Радарски сигнали со централна бранова должина од 3.1 <i>cm</i>
<i>C-band</i>	Радарски сигнали со централна бранова должина од 5.6 <i>cm</i>
<i>S-band</i>	Радарски сигнали со централна бранова должина од 12 <i>cm</i>
<i>L-band</i>	Радарски сигнали со централна бранова должина од 24 <i>cm</i>
<i>P-band</i>	Радарски сигнали со централна бранова должина од 70 <i>cm</i>
<i>IW</i>	<i>Interferometric Wide Swath</i> од <i>Sentinel-1</i> сателитот
<i>EW</i>	<i>Extra Wide Swath</i> од <i>Sentinel-1</i> сателитот
<i>ASC</i>	Растечка орбита (<i>ascending</i>)
<i>DSC</i>	Опаѓачка орбита (<i>descending</i>)
<i>HH</i>	Хоризонтална трансмисија – хоризонтална регистрација на радарски сигнал
<i>VV</i>	Вертикална трансмисија – вертикална регистрација на радарски сигнал
<i>RCS</i>	<i>Radar Cross Section</i> (радарска попречна секција)
<i>DEM</i>	Дигитален елевациски модел
<i>PS</i>	Перманентен расејувач
<i>DS</i>	Дистрибуиран расејувач
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (Прв глобален дигитален елевациски модел)
<i>NASA</i>	Национална управа за аеронаутика и вселена
<i>NGA</i>	Национална агенција за геопросторна разузнавачка служба (САД)
<i>GNSS</i>	Глобални навигациски сателитски системи
<i>SNR</i>	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Однос сигнал – шум)
<i>APS</i>	<i>Atmospheric Phase Screen</i> (Атмосферски фазен прозорец)
<i>ASI</i>	<i>Amplitude Stability Index</i> (Индекс на амплитудна стабилност)
<i>PSC</i>	<i>PS</i> кандидати
<i>SVD</i>	Сингуларна вредносна декомпозиција
<i>SBAS</i>	<i>Small Baseline Subset</i> (<i>InSAR</i> метода за дистрибуирани расејувачи)
<i>RUM</i>	<i>Region of Uniform Motion</i> (Област на униформно движење)
<i>ASF</i>	<i>Alaska Satellite Facility</i> (Портал за симнување на радарски снимки)

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1	Првиот патентиран радарски систем „ТЕЛЕМОБИЛОСКОП	6
Слика 2	Шематски приказ на аквизиција на радарски систем монтиран на авион	7
Слика 3	Резолуцијата во RANGE насока: А) два објекти што се разликуваат поради меѓусебна оддалеченост; Б) два објекти што се прикажуваат како еден поради нивната близина.	9
Слика 4	Процес на компресија на емитираниот пулс	10
Слика 5	Приказ на просторната резолуција во AZIMUTH насока на кратка и долга радарска антена	12
Слика 6	Графички приказ на SAR концептот	13
Слика 7	Процесирање на SAR снимка со фокусирање во двете насоки	15
Слика 8	Приказ на SAR снимка, со амплитудните и фазните информации и SAR координатите.....	17
Слика 9	Аквизирање на SAR снимка со странична аквизиција под агол (θ).....	18
Слика 10	Приказ на геометриските дисторзии, 1. Скратување, 2. Преклопување и 3. Сенка.....	19
Слика 11	Приказ на оригинална аквизиција, геоетриски и радиометриски крегирана	19
Слика 12	Илустрација на растечка (ASCENDING) и опаѓачка (DESCENDING) орбита на SAR сателит	21
Слика 13	Осцилација на електричната и магнетната компонента на електромагнетната радијација.....	22
Слика 14	Приказ на два електромагнетни бранови со различни фреквенции и бранови должини	23
Слика 15	Приказ на амплитудните и фазните вредности на сигналите во ротирачко тркало	25
Слика 16	Приказ на електромагнетниот бран во функција на време и простор (РАСТОЈАНИЕ).....	26
Слика 17	Графички приказ на кардиналниот знак (SINC функција).....	27
Слика 18	Графички приказ на повратни сигнали од два расејувачи	28
Слика 19	Графички приказ на фазната неодреденост	29
Слика 20	Графички приказ на мерење на фазна разлика помеѓу два електромагнетни бранови	30
Слика 21	Комбинации на линеарна поларизација	32
Слика 22	Графичка интерпретација на интерференцијата на брановите, во синусиодален приказ и векторски приказ	33
Слика 23	Векторска интерпретација на интерференцијата на повеќе електромагнетни бранови.....	34
Слика 24	Графички приказ на кохерентни и некохерентни бранови	35
Слика 25	Приказ на рефлексија и расејување на електромагнетен бран	36
Слика 26	Расејувачки процес во рамките на резолуционата ќелија	37
Слика 27	Графички приказ на типовите на расејување	37
Слика 28	Приказ на интеракција на X, C, L и P-BAND со вегетирана површина	39
Слика 29	Процес на ко-регистрација (порамнување) на SAR снимките	42
Слика 30	INSAR концепт помеѓу две точки T_1 и T_2 , аквизирани од две снимки S_1 и S_2	44
Слика 31	Геометриска интерпретација на ефектот на рамен терен предизвикан од модулот 2π	45
Слика 32	Приказ на интерферограмот пред и после корекцијата за FLAT-TERRAIN.....	46
Слика 33	Улога на нормалниот базен вектор врз сензитивноста кон топографската компонента	47
Слика 34	Симулација на топографска компонента од планинска конфигурација а) со помал нормален базен вектор B_n б) со три пати поголем базен вектор во однос на првиот случај в) попречен пресек на топографијата на теренот	47
Слика 35	Симулација на идеализирана топографска компонента од планинска конфигурација со сигнали со различни бранови должини а) X-BAND б) C-BAND в) L-BAND	48
Слика 36	Графички приказ од модулирана и демодулирана фаза од топографска компонента	48
Слика 37	Симулација на фазно демодулирање на идеализирана интерферометриска фаза	49
Слика 38	SRTM мисија	50
Слика 39	SOPERNICUS DEM мисија.....	51
Слика 40	Графички приказ на основниот концепт на DINSAR	52
Слика 41	Приказ на интерферограм пред корекција на топографската компонента и диференцијален интерферограм	54
Слика 42	Колоритни низи (FRINGES) при различни типови на деформации.....	55
Слика 43	Различна разместеност на расејувачите поради различна геометрија при двете SAR аквизиции	56
Слика 44	Графичка интерпретација на интерферометриската кохерентност	57

Слика 45	Кохерентни мапи на X, C и L-BAND СИГНАЛИТЕ НА ИСТА ПОВРШИНА ОКОЛУ ВУЛКАНОТ ЕТНА, ИТАЛИЈА	58
Слика 46	ПРИКАЗ НА ФИЛТРИРАН ИНТЕРФЕРОГРАМ СО GOLDSTEIN ФИЛТЕРОТ	59
Слика 47	ОСУМ ДИФЕРЕНЦИЈАЛНИ ИНТЕРФЕРОГРАМИ КОИ ПОКРИВААТ ИСТА ПОВРШИНА ОД 100x100 КМ КОИ ПОКАЖУВААТ ЛАЖНИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВРШИНАТА ЗАРАДИ ПРИСУСТВО НА АТМОСФЕРСКАТА КОМП.	60
Слика 48	ПРИКАЗ НА ФАЗНИОТ ОБРАЗЕЦ ПРИ ТУРБУЛЕНЦИЈА И СТРАТИФИКАЦИЈА	61
Слика 49	ПРИКАЗ НА КРЕИРАЊЕ НА ИНТЕРФЕРОГРАМИ ВО PSINSAR	66
Слика 50	ГРАФИЧКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА НА ПУКСЕЛ КОЈ СОДРЖИ ПЕРМАНЕНТЕН РАСЕЈУВАЧ	67
Слика 51	ГРАФИЧКА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА НА: А) ДИЕДРАЛНО РАСЕЈУВАЊЕ Б) СПЕКУЛАРНО РАСЕЈУВАЊЕ	68
Слика 52	ФАЗНА ВАРИЈАЦИЈА НА А) DISTRIBUTED SCATTERER (DS) ТОЧКА Б) PERMANENT SCATTERER (PS) ТОЧКА	69
Слика 53	ПРИКАЗ НА ДИСТРИБУЦИЈАТА НА МОЖНИ РЕШЕНИЈА ПРИ МАКСИМИЗАЦИЈАТА НА ПЕРИОДОГРАМ	73
Слика 54	ПРИКАЗ НА МОДЕЛИРАНАТА ДЕФОРМАЦИСКА КОМПОНЕНТА ЛИНЕАРНА НА ВРЕМЕНСКИОТ БАЗЕН ВЕКТОР	73
Слика 55	ПРИКАЗ НА МОДЕЛИРАНАТА ТОПОГРАФСКА КОМПОНЕНТА ЛИНЕАРНА НА НОРМАЛНИОТ БАЗЕН ВЕКТОР	74
Слика 56	МРЕЖА ОД PS КАНДИДАТИ	75
Слика 57	СПОРЕДБА НА ДВА APS ОД ДВЕ АКВИЗИЦИИ: 05.10.2014 (ЛЕВО) И 22.07.2018 (ДЕСНО)	78
Слика 58	ПРИКАЗ НА ПРОСЕЧНАТА ТЕМПОРАЛНА КОХЕРЕНТНОСТ ОД SARPROZ СОФТВЕРОТ	80
Слика 59	ГРАФИЧКИ ПРИКАЗ НА ПРОСЕЧНА ПРОСТОРНА КОХЕРЕНТНОСТ ЗА СЕКОЈА АКВИЗИЦИЈА (SAPROZ СОФТВЕР) ..	81
Слика 60	ПРИКАЗ НА ПРОСЕЧНА ПРОСТОРНА КОХЕРЕНТНОСТ ЗА СЕКОЈА АКВИЗИЦИЈА СО СЕЗОНСКИ ЕФЕКТ	82
Слика 61	ПРИКАЗ НА ПРОСЕЧНА ПРОСТОРНА КОХЕРЕНТНОСТ ЗА СЕКОЈА АКВИЗИЦИЈА БЕЗ СЕЗОНСКИ ЕФЕКТ	84
Слика 62	ПРИКАЗ НА ЛИНЕАРЕН И НЕЛИНЕАРЕН МОДЕЛ НА ПОМЕСТУВАЊЕ	86
Слика 63	ПРИКАЗ НА ОДНЕСУВАЊЕТО НА АМПЛИТУДИТЕ НА PS И DS ПИКСЕЛИ	87
Слика 64	МРЕЖА ОД ИНТЕРФЕРОГРАМИ ПРИ: А) PSINSAR ТЕХНИКАТА И Б) SBAS ТЕХНИКАТА	88
Слика 65	А) STAR ГРАФИК (PSINSAR), Б) МОДИФИЦИРАН FULL ГРАФИК СО МАКСИМАЛЕН V_T ОД ЕДНА ГОДИНА (QPSINSAR)	90
Слика 66	ПРИКАЗ НА LOS ПОМЕСТУВАЊА ВО РАСТЕЧКА (ASCENDING) И ОПАЃАЧКА (DESCENDING) ОРБИТА	92
Слика 67	ГЕОМЕТРИСКИ ПРИКАЗ НА АЗИМУТАЛНИОТ АГОЛ ВО А) РАСТЕЧКА И Б) ОПАЃАЧКА ОРБИТА	93
Слика 68	ТОПОГРАФСКИ (ЛЕВО) И РЕЉЕФЕН (ДЕСНО) ПРИКАЗИ НА СКОПСКАТА КОТЛИНА	96
Слика 69	ПРИКАЗ НА АНАЛИЗИРАНАТА ПОВРШИНА (AOI) ЗА СКОПСКАТА КОТЛИНА СО SENTINEL-1 (ASCENDING СНИМКИ) ..	99
Слика 70	STAR ГРАФИК ЗА PSINSAR АНАЛИЗА ЗА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА СО SENTINEL – 1 СНИМКИ ОД РАСТЕЧКА ОРБИТА	99
Слика 71	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА (ASCENDING ДАТАСЕТ)	100
Слика 72	ПРОСТОРНА РАСПРЕДЕЛБА НА PS ТОЧКИ И БРЗИНИ НА ПОМЕСТУВАЊЕ (ММ/ГОД) ЗА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА – РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1)	101
Слика 73	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД НАСЕЛБА ПРИПОР, РАСТЕЧКА ОРБИТА (S-1)	102
Слика 74	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД НАСЕЛБА ПРИПОР, РАСТЕЧКА ОРБИТА (S-1)	102
Слика 75	3D ПРИКАЗ НА БЛАГОЗАКОСНИОТ ТЕРЕН НАД ЦЕМЕНТАРНИЦА “УСЈЕ” (GOOGLE EARTH)	103
Слика 76	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА PS СТАБИЛНА ТОЧКА И DS ТОЧКА СО ТРЕНД НА СЛЕГНУВАЊЕ ОД INSAR АНАЛИЗИТЕ СО SENTINEL – 1 СНИМКИ ОД РАСТЕЧКА ОРБИТА	104
Слика 77	ПРИКАЗ НА АНАЛИЗИРАНАТА ПОВРШИНА (AOI) ЗА СКОПСКАТА КОТЛИНА СО SENTINEL-1 (DESCENDING)	105
Слика 78	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА (DESCENDING ДАТАСЕТ)	105
Слика 79	ПРОСТОРНА РАСПРЕДЕЛБА НА PS ТОЧКИ И БРЗИНИ НА ПОМЕСТУВАЊЕ (ММ/ГОД) ЗА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА – ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1)	106
Слика 80	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД НАСЕЛБА ПРИПОР, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (S-1)	107
Слика 81	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД НАСЕЛБА ПРИПОР, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (S-1)	108
Слика 82	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА PS СТАБИЛНА ТОЧКА И DS ТОЧКА СО ТРЕНД НА ИЗДИГНУВАЊЕ ОД INSAR АНАЛИЗИТЕ СО SENTINEL – 1 СНИМКИ ОД ОПАЃАЧКА ОРБИТА	108
Слика 83	ПРИКАЗ НА ИСТОЧНО – ЗАПАДНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА НА INSAR АНАЛИЗИТЕ НА НЕСТАБИЛНАТА ЗОНА ВО НАСЕЛБА ПРИПОР	109
Слика 84	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА СТАБИЛНА ТОЧКА И ТОЧКА СО ТРЕНД НА ПОМЕСТУВАЊЕ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ИСТОК–ЗАПАД КОМПОНЕНТА НА ДВИЖЕЊЕ	110
Слика 85	ПРИКАЗ НА ВЕРТИКАЛНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА НА INSAR АНАЛИЗИТЕ НА НЕСТАБИЛНАТА ЗОНА ВО НАСЕЛБА ПРИПОР	111

Слика 86	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА СТАБИЛНА ТОЧКА И ТОЧКА СО ТРЕНД НА ПОМЕСТУВАЊЕ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ВЕРТИКАЛНА КОМПОНЕНТА НА ДВИЖЕЊЕ.....	112
Слика 87	STAR ГРАФИК ЗА PSINSAR АНАЛИЗА ЗА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА СО TERRASAR – X СНИМКИ ОД РАСТЕЧКА ОРБИТА.....	113
Слика 88	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА СО КОРИСТЕЊЕ НА TERRASAR – X СНИМКИ НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА (ASCENDING ДАТАСЕТ)	114
Слика 89	ПРОСТОРНА РАСПРЕДЕЛБА НА PS ТОЧКИ И БРЗИНИ НА ПОМЕСТУВАЊЕ (ММ/ГОД) ЗА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА – ОПАЃАЧКА ОРБИТА (TERRASAR – X)	115
Слика 90	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД ПРИПОР, РАСТЕЧКА ОРБИТА (TERRASAR – X).....	116
Слика 91	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ОД ПРИПОР, РАСТЕЧКА ОРБИТА (TERRASAR – X).....	116
Слика 92	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА PS СТАБИЛНА ТОЧКА И DS ТОЧКА СО ТРЕНД НА СЛЕГНУВАЊЕ ОД INSAR АНАЛИЗИТЕ СО TERRASAR – X СНИМКИ ОД РАСТЕЧКА ОРБИТА	117
Слика 93	ТОПОГРАФСКИ (ЛЕВО) И РЕЉЕФЕН (ДЕСНО) ПРИКАЗИ НА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА	120
Слика 94	ПРИКАЗ НА АНАЛИЗИРАНИТЕ ПОВРШИНИ (АОИ) ВО ПОЛОШКАТА КОТЛИНА СО SENTINEL-1 ВО ДВЕТЕ ОРБИТИ ...	121
Слика 95	STAR ГРАФИК ЗА PSINSAR (ЛЕВО) И МОДИФИЦИРАН ЦЕЛОСЕН ГРАФИК ЗА QPSINSAR (ДЕСНО) АНАЛИЗА.....	122
Слика 96	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА СО КОРИСТЕЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИ ВО ПОЛОШКАТА КОТЛИНА (ASCENDING ДАТАСЕТ).....	123
Слика 97	ПРОСТОРНА РАСПРЕДЕЛБА НА PS ТОЧКИ И БРЗИНИ НА ПОМЕСТУВАЊЕ (ММ/ГОД) ЗА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА И ОКОЛНАТА ПЛАНИНСКА ПОВРШИНА – РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL – 1)	124
Слика 98	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА СО КОРИСТЕЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИ ВО ПОЛОШКАТА КОТЛИНА (DESCENDING ДАТАСЕТ).....	125
Слика 99	ПРОСТОРНА РАСПРЕДЕЛБА НА PS ТОЧКИ И БРЗИНИ НА ПОМЕСТУВАЊЕ (ММ/ГОД) ЗА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА И ОКОЛНАТА ПЛАНИНСКА ПОВРШИНА – ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL – 1).....	126
Слика 100	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	127
Слика 101	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	127
Слика 102	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ СО ТРЕНД НА ИЗДИГНУВАЊЕ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (S-1)	128
Слика 103	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1)	129
Слика 104	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	130
Слика 105	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ СО ТРЕНД НА СЛЕГНУВАЊЕ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (S-1)	130
Слика 106	ПРИКАЗ НА ИСТОЧНО – ЗАПАДНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ	131
Слика 107	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ ВО ЦЕНТРАЛНОТО ЈАДРО И ВЛЕЗНИОТ СЕКТОР НА СЕЛО СЕЛЦЕ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ИСТОК–ЗАПАД КОМПОНЕНТА НА ПОМЕСТУВАЊЕ	132
Слика 108	ПРИКАЗ НА ВЕРТИКАЛНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА ВО СЕЛО СЕЛЦЕ	133
Слика 109	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ ВО ЦЕНТРАЛНОТО ЈАДРО И ВЛЕЗНИОТ СЕКТОР НА СЕЛО СЕЛЦЕ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ВЕРТИКАЛНА КОМПОНЕНТА НА ПОМЕСТУВАЊЕ	134
Слика 110	ПРОСТОРНА ПОСТАВЕНОСТ И 3D ПОГЛЕД НА ТЕРЕНОТ ВО КОЈ Е СМЕСТЕНО СЕЛОТО СЕЛЦЕ (GOOGLE EARTH)..	134
Слика 111	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	135
Слика 112	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1)....	136
Слика 113	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ КАРАКТЕРИСТИЧНИ ТОЧКИ ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	137
Слика 114	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	138
Слика 115	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА ЛОКАЛНО НЕСТАБИЛНА ЗОНА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1) ...	138
Слика 116	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ КАРАКТЕРИСТИЧНИ ТОЧКИ ВО СЕЛО РАКОВЕЦ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	139
Слика 117	ПРИКАЗ НА ИСТОЧНО – ЗАПАДНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ	140
Слика 118	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ ВО СЕВЕРНИОТ И ЈУЖНИОТ ДЕЛ НА СЕЛО РАКОВЕЦ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ИСТОК–ЗАПАД КОМПОНЕНТА НА ПОМЕСТУВАЊЕ	141
Слика 119	ПРИКАЗ НА ВЕРТИКАЛНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА ВО СЕЛО РАКОВЕЦ.....	142
Слика 120	ПРИКАЗ НА ВРЕМЕНСКИТЕ СЕРИИ НА ДВЕ ТОЧКИ ВО СЕВЕРНИОТ И ЈУЖНИОТ ДЕЛ НА СЕЛО РАКОВЕЦ, ДОБИЕНИ ОД ДЕКОМПОЗИРАНАТА ВЕРТИКАЛНА КОМПОНЕНТА НА ПОМЕСТУВАЊЕ	142
Слика 121	ПРОСТОРНА ПОСТАВЕНОСТ И 3D ПОГЛЕД НА ТЕРЕНОТ ВО КОЈ Е СМЕСТЕНО СЕЛОТО РАКОВЕЦ	143
Слика 122	ПРОСТОРНА ПОСТАВЕНОСТ И 3D ПОГЛЕД НА БРАНА ЛИСИЧЕ.....	146
Слика 123	ПРИКАЗ НА АНАЛИЗИРАНИТЕ ПОВРШИНИ (АОИ) ОКОЛУ БРАНА ЛИСИЧЕ СО SENTINEL-1 ВО ДВЕТЕ ОРБИТИ	147

Слика 124	STAR ГРАФИК ЗА PSINSAR (ЛЕВО) И МОДИФИЦИРАН ЦЕЛОСЕН ГРАФИК ЗА QPSINSAR (ДЕСНО) АНАЛИЗА	148
Слика 125	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА СО КОРИСТЕЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИ ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ (ASCENDING ДАТАСЕТ)	148
Слика 126	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	149
Слика 127	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ, РАСТЕЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	150
Слика 128	ТЕСТ НА ОПРЕДЕЛЕНИТЕ APS ЗА СЕКОЈА КОРИСТЕНА СНИМКА ВО АНАЛИЗАТА СО КОРИСТЕЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИ ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ (DESCENDING ДАТАСЕТ).....	151
Слика 129	PSINSAR АНАЛИЗА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1).....	152
Слика 130	QPSINSAR АНАЛИЗА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ, ОПАЃАЧКА ОРБИТА (SENTINEL-1)	153
Слика 131	ПРИКАЗ НА МОДИФИЦИРАНАТА ИСТОЧНО – ЗАПАДНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА НА LOS ПОМЕСТУВАЊАТА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ	154
Слика 132	ПРИКАЗ НА ВЕРТИКАЛНАТА КОМПОНЕНТА ОД ДЕКОМПОЗИЦИЈАТА ЗА БРАНА ЛИСИЧЕ.....	155
Слика 133	ПРИКАЗ НА ГЕОДЕТСКАТА МРЕЖА ВО ЛОКАЛЕН КООРДИНАТЕН СИСТЕМ НА БРАНА ЛИСИЧЕ	157
Слика 134	ПРИКАЗ НА ПОМЕСТУВАЊАТА ПО X – ОСКАТА НА БРАНА ЛИСИЧЕ ОД ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА	159
Слика 135	ПРИКАЗ НА ВЕРТИКАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА НА БРАНА ЛИСИЧЕ ОД ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА	160
Слика 136	РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ХОРИЗОНТАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА НА БРАНА ЛИСИЧЕ СО INSAR И ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА	161
Слика 137	СПОРЕДБА НА ВРЕМЕНСКИ СЕРИИ НА ХОРИЗОНТАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА НА ДВЕ ТОЧКИ ОПРЕДЕЛЕНИ СО INSAR И ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА	162
Слика 138	РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ВЕРТИКАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА НА БРАНА ЛИСИЧЕ СО INSAR И ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА	163
Слика 139	СПОРЕДБА НА ВРЕМЕНСКИ СЕРИИ НА ВЕРТИКАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА НА ДВЕ ТОЧКИ ОПРЕДЕЛЕНИ СО INSAR И ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА (ПРЕЦИЗЕН НИВЕЛМАН)	164

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

ТАБЕЛА 1	ПРЕГЛЕД НА СИТЕ ФРЕКВЕНЦИСКИ ОПСЕЗИ КОИ СЕ КОРИСТАТ ВО SAR СИСТЕМИТЕ [70]	38
ТАБЕЛА 2	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА АНАЛИЗА НА УРБАНАТА ЗОНА ОД СКОПСКАТА КОТЛИНА (РАСТЕЧКА ОРБИТА).....	98
ТАБЕЛА 3	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ PSINSAR АНАЛИЗАТА НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА, СО SAR СНИМКИТЕ ОД РАСТЕЧКАТА ОРБИТА	100
ТАБЕЛА 4	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА АНАЛИЗА НА УРБАНАТА ЗОНА ОД СКОПСКАТА КОТЛИНА (ОПАЃАЧКА ОРБИТА).....	104
ТАБЕЛА 5	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ PSINSAR АНАЛИЗАТА НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА, СО SAR СНИМКИТЕ ОД ОПАЃАЧКА ОРБИТА	106
ТАБЕЛА 6	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ TERRASAR – X СНИМКИ ЗА АНАЛИЗА НА УРБАНАТА ЗОНА ОД СКОПСКАТА КОТЛИНА (РАСТЕЧКА ОРБИТА).....	113
ТАБЕЛА 7	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ PSINSAR АНАЛИЗАТА НА УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА, СО TERRASAR – X СНИМКИТЕ ОД РАСТЕЧКАТА ОРБИТА	114
ТАБЕЛА 8	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА INSAR АНАЛИЗИТЕ НА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА (РАСТЕЧКА ОРБИТА).....	122
ТАБЕЛА 9	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ PSINSAR АНАЛИЗАТА НА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА, СО ПРОЦЕСИРАЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИТЕ ОД РАСТЕЧКАТА ОРБИТА	123
ТАБЕЛА 10	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА INSAR АНАЛИЗИТЕ НА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА (ОПАЃАЧКА ОРБИТА).....	124
ТАБЕЛА 11	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ PSINSAR АНАЛИЗАТА НА ПОЛОШКАТА КОТЛИНА, СО ПРОЦЕСИРАЊЕ НА SENTINEL – 1 СНИМКИТЕ ОД ОПАЃАЧКА ОРБИТА	125
ТАБЕЛА 12	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА АНАЛИЗА НА БРАНА ЛИСИЧЕ (РАСТЕЧКА ОРБИТА).....	147
ТАБЕЛА 13	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ INSAR АНАЛИЗИТЕ НА БРАНА ЛИСИЧЕ, СО SAR СНИМКИТЕ ОД РАСТЕЧКАТА ОРБИТА.....	149
ТАБЕЛА 14	ОСНОВНИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА КОРИСТЕНИТЕ SENTINEL-1 СНИМКИ ЗА АНАЛИЗА НА БРАНА ЛИСИЧЕ (ОПАЃАЧКА ОРБИТА).....	151
ТАБЕЛА 15	КООРДИНАТИ НА РЕФЕРЕНТНАТА ТОЧКА ПРИ INSAR АНАЛИЗИТЕ НА БРАНА ЛИСИЧЕ, СО SAR СНИМКИТЕ ОД ОПАЃАЧКА ОРБИТА.....	152
ТАБЕЛА 16	ГЕОДЕТСКИ ОСКУЛТАЦИИ НА БРАНА ЛИСИЧЕ ВО ПЕРИОДОТ 2014 – 2024 ГОД.	156

1. ВОВЕД

Следењето на Земјините деформации претставува еден од најзначајните предизвици во современите геонауки и инженерството. Континуираното и прецизно набљудување на движењата на Земјината површина има суштинска улога во разбирањето на геодинамичките процеси, во управувањето со природните ризици и во заштитата на инфраструктурата и населението. Традиционалните геодетски методи, овозможуваат висока точност, но нивната примена е ограничена од аспект на просторната и временската покриеност, како и оперативна сложеност за редовен и детален мониторинг.

Во последните две децении, развојот на сателитските технологии и далечинската детекција овозможија примена на современи методи кои обезбедуваат континуиран и детален мониторинг на Земјината површина. Во таа насока, SAR интерферометријата (*InSAR*) се издвојува како најефикасен пристап кој може доверливо да одговори на предизвиците за обезбедување континуирано и детално следење на промените во Земјината површина на локално и глобално ниво, со висока точност.

Развојот на *InSAR* беше поттикнат со лансирањето на првите вештачки SAR сателити, како што се: *ERS-1*, *ENVISAT* и *RADARSAT*, кои овозможија глобална достапност на радарски податоци. Сепак, вистинската револуција започна со мисијата *Sentinel-1* сателити на Европската вселенска агенција (*ESA*), од 2014 година. Со нејзината висока просторна и временска резолуција, бесплатната пристап на податоците и стабилна орбитална конфигурација, *Sentinel-1* ја отвори новата ера на *InSAR* анализите. Паралелно со неа, комерцијалните сателити како *TerraSAR-X* и *COSMO-SkyMed* овозможија снимки со висока просторна и временска резолуција, што дополнително ја зголеми можноста за мониторинг на критични инфраструктури и урбани подрачја. Во таа насока, штотуку започнатата мисија *NISAR* претставува продолжение на овој развоен тренд, обезбедувајќи нови SAR аквизиции кои ќе дадат дополнителен импулс во континуираните и детални *InSAR* анализи на глобално ниво.

1.1 ПРЕГЛЕД НА НАУЧНИТЕ ДОСТИГНУВАЊА ВО ОБЛАСТА

Покрај зголемениот број на активни SAR мисии, кои овозможија континуирана и глобална достапност на радарските податоци, значаен напредок во развојот на *InSAR* технологијата е постигнат и преку усовршувањето на алгоритмите за обработка и анализа на временски серии. Особено важна улога во оваа еволуција има појавата на *PSInSAR* техниката [36], која овозможи да се надминат ограничувањата на класичниот диференцијален *InSAR* и да се воспостави методолошка основа за прецизно следење на стабилни кохерентни точки во подолг временски период. По нејзиното појавување следуваа бројни модификации и усовршувања на *PS* пристапот [39], [37], [57], [63], како и развојот на *DS* пристапот на дистрибуирани расејувачи преку *SBAS* методологијата [4] [67], [10], [75] со посебен акцент на *QPSInSAR* техниката [98] која заедно со стандардниот *PS* пристап се применува во рамките на овој докторски труд.

Од првичните експериментални примени во урбани подрачја и инфраструктурни објекти, *InSAR* еволуираше во глобално препознаена и широко применувана методологија за следење на различни геодинамички процеси. Нејзината примена денес опфаќа широк спектар на задачи,

почнувајќи од мониторинг на сеизмички деформации и свлечишта, консолидација на насипи, рударски активности, па се до следење на брани и други инженерски објекти. Евидентно е дека во последните години се забележува значителен пораст на бројот на објавени трудови посветени на *InSAR* апликациите, што укажува на континуирано зголемување на интересот, како и на бројот на истражувачи и институции кои ја применуваат оваа технологија во својата практика.

Современите апликативни истражувања во оваа област потврдуваат дека напредните *InSAR* техники се применуваат како сигурен инструмент за детекција и квантитативна анализа на земјините деформации во различни просторни услови. Во урбаните подрачја, повеќе трудови демонстрираат висока согласност меѓу резултатите добиени од *InSAR* анализите и независните геодетски мерења, што ја потврдува доверливоста на методологијата при следење на слегнувања предизвикани од урбани и инфраструктурни активности [70], [123], [116], [12]. Во планинските и руралните средини, истражувањата укажуваат дека комбинираната примена на *PS* и *DS* пристапите овозможува стабилна детекција на бавни гравитациски процеси и свлечишта, дури и во подрачја со изразена топографија и променливи вегетационски услови [71], [13], [92]. Во контекст на инженерските објекти, посебно внимание е посветено на примената на *InSAR* за мониторинг на брани, каде резултатите покажуваат висока согласност со податоците од класичните геодетски методи [62], [102], [1], [45], [89].

Во последните години, на територијата на Балканскиот Полуостров се спроведуваат сè повеќе истражувања кои ја демонстрираат применливоста на напредните *InSAR* техники во различни просторни контексти. Посебно значаен е трудот [110], во кој преку анализа на *Sentinel-1* податоци е извршено следење на деформации во урбаните подрачја на Солун и Халкидики (Грција), при што се идентификувани зони на слегнување предизвикани од прекумерно искористување на подземни води. Исто така, [22] презентираат примена на *SBAS* методологија за мониторинг на свлечиштето во југозападна Словенија, комбинирајќи сателитски временски серии со теренски мерења од инклинометри и пиезометри, со што се обезбедува детална карактеризација на динамиката на свлечиштето.

Овие истражувања ја потврдуваат сè поизразената улога на *InSAR* техниките во научните и апликативните активности во регионот и светот. Истовремено, тие укажуваат на јасен тренд на нејзино проширување и интегрирање во различни области на геонауките и инженерството, што претставува значаен чекор кон воспоставување на *InSAR* како составен дел од современите системи за мониторинг на Земјините деформации.

1.2 ПРЕДМЕТ И ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Предмет на истражувањата во овој докторски труд се теоретска и апликативна разработка на *SAR* интерферометријата, со посебен акцент на напредните техники базирани на временски серии. Во рамките на трудот се обработуваат физичките и математичките основи на *InSAR* методологијата, принципите на обработка на *SAR* податоците и алгоритмите за анализа на перманентните и дистрибуираните расејувачи.

Целта на овие истражувања е проценка на сигурноста и точноста при мониторинг на деформации во урбана и рурална средина, како и на еден инженерски објект. Притоа, се настојува да се обезбеди репрезентативна проценка на применливоста и точноста на *InSAR* техниките под различни сценарија на теренот и неговата функционална намена.

Во таа насока, предмет на анализа се следните три студии на случај:

1. **Мониторинг на деформации во урбаната зона на Скопската Колина;**
2. **Мониторинг на деформации во Полошката Колина и нејзината планинска околина;**
3. **Мониторинг на деформации на настилната брана Лисиче.**

Преку овие студии се овозможува систематска проценка на потенцијалите на напредните *InSAR* техники (*PSInSAR* и *QPSInSAR*) за прецизно детектирање и квантитативна анализа на деформациите, нивната просторна распределба и временска динамика. Дополнително, извршена е споредба на резултатите добиени од *InSAR* анализите со оние од класичните геодетски методи, со цел да се утврди степенот на нивна усогласеност и веродостојност.

Истражувањето има за цел да потврди дека напредните *InSAR* техники претставуваат сигурна, економична и ефикасна алтернатива и надолжување на традиционалните геодетски методи. Притоа, тие покажуваат значаен потенцијал за примена во системите за редовен мониторинг на урбани подрачја, планински региони и критични инженерски објекти, каде што континуираното следење на геометриската стабилност е од клучно значење.

1.3 ОЧЕКУВАН НАУЧЕН ПРИДОНЕС

Научниот придонес на ова истражување може да се согледа од два аспекти. Прво, трудот претставува прв систематизиран теоретски и методолошки концепт посветен на *InSAR* изработен на македонски јазик, во кој се обработени основните физички принципи, математичките модели и алгоритмите за анализа на временските серии. Ова создава важна основа за идни истражувања, наставна и стручна литература во областа на далечинската детекција.

Од друга страна, истражувањата презентирани во рамките на овој труд се преточени преку три студии на случај кои овозможуваат сеопфатна проценка на применливоста на напредните *InSAR* техники во различни просторни и функционални услови. Во рамките на првите две студии, детектирани се три критични локализираните зони на нестабилност, една во скопската населба Припор и две во тетовските села Селце и Раковец. Овие зони претставуваат подрачја од особено значење за натамошно истражување, каде потребно е спроведување на дополнителни геодетски и геотехнички мониторинг кампањи со цел верификација на добиените *InSAR* резултати и навремено превземање на соодветни мерки.

Во третата студија, посветена на браната Лисиче, *InSAR* резултатите беа подложени на директна споредба со податоците од геодетските мерења, што овозможи проверка на точноста и конзистентноста на добиените резултати. Споредбата покажа висока согласност на деформациските трендови, при што *InSAR* анализите успешно ги потврдија резултатите од геодетските теренски мерења. Ваквата согласност меѓу двете техники потврдува дека *InSAR* може да се користи како дополнителен и доверлив инструмент во системите за инженерски мониторинг, обезбедувајќи поширока просторна перспектива и можност за рана идентификација на потенцијални деформациски аномалии.

Спроведените истражувањето не само што ја потврдуваат научната валидност на применетата методологија, туку создава и реална основа за нејзина понатамошна примена во инженерската и геодетската пракса во земјата.

1.4 КРАТКА СОДРЖИНА НА ТРУДОТ

Трудот е структуриран така што на систематски редослед го следи процесот на истражување, почнувајќи од теоретските основи на SAR технологијата, преку развојот на напредните *InSAR* техники и нивната примена во реални услови, до добиените резултати, заклучоци и препораки. Целта на ваквата организација е да се обезбеди јасна врска меѓу теоретските поставки и практичната примена на методологијата, како и целосен увид во можностите на *InSAR* за мониторинг на земјини деформации во различни просторни контексти.

Првојто поглавје ги опфаќа причините и научната оправданост за изборот на темата, целите и предметот на истражувањето, како и очекуваниот научен придонес. Во него е даден и општ преглед на структурата на трудот и логичката поврзаност меѓу теоретскиот и апликативниот дел, со што се поставува основата за понатамошна анализа на теоретските принципи и примената на напредните *InSAR* техники во следните поглавја.

Второто поглавје ги содржи теоретските основи на SAR технологијата. Во него се разработени принципите на функционирање на радарските системи, карактеристиките на синтетичката антена (SAR сензорот), факторите што влијаат врз просторната резолуција и геометриските дисторзии на снимките и слично. Детално се обработени и физичките својства на електромагнетните бранови, нивната фаза, амплитуда, кохерентност и поларизација, кои несомнено претставуваат основа за разбирање на SAR интерферометријата.

Трето поглавје претставува клучна теоретска целина во која се разработени основите на SAR интерферометријата и напредните *InSAR* техники. Подетално се објаснети концептите на класичната и диференцијалната интерферометрија, фазните компоненти, ефектите на атмосферата и потребата од примена на мулти-интерферограмски техники. Посебно внимание е посветено на напредните *InSAR* техники *PSInSAR* и *QPSInSAR*, при што подетално се објаснети нивните принципи, математичка основа и начинот на моделирање на временските серии.

Четвртото поглавје претставува суштинскиот дел од трудот и го опфаќа практичниот сегмент на истражувањето. Во него се прикажани резултатите од примената на *InSAR* техниките за три карактеристични подрачја:

- Урбаната зона на Скопската Котлина, каде е детектирана локализирана зона на нестабилност во населбата Припор.
- Полошката Котлина и нејзината планинска околина, каде се идентификувани зони со тивки свлечишта во околината на селата Селце и Раковец.
- Насипната брана Лисиче, кај која *InSAR* резултатите се верификувани преку споредба со геодетски мерења, што потврдува висока согласност на добиените резултати.

Петтото поглавје ги обединува заклучоците и препораките, во кои се истакнуваат резултати од истражувањето и се предлагаат насоки за нивна практична имплементација.

Шестото и седмото поглавје се однесуваат на користена литература и прилозите во трудот.

Со ваквата структура, трудот претставува заокружена целина која на систематичен начин ја поврзува теоријата, методологијата и примената, обезбедувајќи јасна и аргументирана слика за потенцијалот на напредните *InSAR* техники во современиот мониторинг на Земјините деформации.

2. ТЕОРЕТСКИ ОСНОВИ НА SAR ТЕХНОЛОГИЈАТА

Терминот “*InSAR*” претставува кратенка од *SAR (Synthetic Aperture Radar)* интерферометрија. Појдовната технолошка основа за развој на оваа методологија е појавата на радарот. Радарот, како активна сензорска технологија, се базира на концептот на користење на електромагнетни бранови за детектирање на објекти и мерење на нивната оддалеченост. Од друга страна, *SAR* концептот претставува надградба на оваа технологија, која овозможува значително зголемување на просторната резолуција на радарската снимка, преку виртуелно продолжување на должината на радарската антена (*synthetic aperture*) користејќи ја брзината на движење на платформата на која е поставен радарот, по однаред дефинирана траекторија. Кога овие *SAR* системи се инсталирани на вештачки лансирани сателити во вселената, се овозможува систематско и континуирано аквизирање на целата површина на Земјата, со висока просторна и временска резолуција, независно од облачноста или дневната светлина. Врз основа на ова, *InSAR* методологијата се заснова на користење на аквизирани *SAR* снимки од слични орбитални позиции, со цел да се анализира фазната разлика и да се детектираат поместувања на набљудуваните површини со висока прецизност.

Во ова поглавје е прикажан краток преглед на овие технологии, почнувајќи од историскиот контекст на радарските системи, преку концептуалните основи на *SAR* сензорите, па сè до математичката основа на кои почива оваа технологија. Познавањето на основниот концепт на *SAR* сензорите претставува прв предуслов за подлабоко согледување на напредните *InSAR* техники, кои овозможуваат континуирано следење на мали деформации, анализа на долгорочни временски серии и разграничување на поместувањата во различни просторни компоненти.

2.1 РАДАР

Поимот *radar* претставува кратенка од англиските термини *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging – *RADAR*, што во буквален превод значи “*радио-детекција и мерење на оддалеченост*”. Овој термин истовремено се однесува на техниката и на инструмент што ја применува таа техника. Радарскиот инструмент емитува електромагнетни сигнали (пулсови) во микробрановото подрачје од електромагнетниот спектар и ги детектира одбиените сигнали од објектите кои се наоѓаат во насоката на радијацијата. Одбиените сигнали настануваат како резултат на *процесот на расејување (scattering)*, при што дел од енергијата на електромагнетниот сигнал се одбива назад кон инструментот. Техниката се базира на анализа на времето потребно за двонасочното патување на сигналот (од емитирањето до објектот и назад), со што се овозможува определување на растојанието од инструментот до објектот. Покрај тоа, интензитетот на одбиениот сигнал, т.е. *повраќајното расејување (backscatter)*, обезбедува информации за физички својства на објектот, како што се неговата големина, форма или рапавост на неговата површина. Објектот или точката што го предизвикува овој ефект се нарекува *расејувач (scatterer)*¹. [106] [3]

¹ Терминот „расејувач“ (*scatterer*) е општо прифатен во радарската терминологија и се однесува на објект или точка што предизвикува пренасочување на електромагнетниот сигнал. Повеќе за расејувањето е разработено во подпоглавјето 2.3.7 Расејување на електромагнетните бранови

2.1.1 Историски развој на радарската технологија

Развојот на радарската технологија е тесно поврзан со неколку клучни научни откритија што ги поставиле нејзините теоретски и технолошки основи. Првиот важен чекор се *Максвеловите равенки за електромагнетизам*, објавени во 1873 година во делото *Treatise on Electricity and Magnetism*, со кои се формализира постоењето и однесувањето на електромагнетните бранови. Следниот историски момент е поврзан со експериментите на *Хенрик Херц* во 1886 година, кој за прв успеал да генерира и детектира радиобранови и да ја покаже нивната способност за рефлексија и расејување. [53]

Првите функционални радарски системи започнале да се развиваат уште на почетокот на 20-от век. Еден од првите такви уреди е „*Telemobiloskop*“ на *Кристијан Хулсмаер*, патентиран како изум во 1904 година, кој бил наменет за следење на бродови и избегнување судири.



Слика 1 Првиот патентиран радарски систем „*Telemobiloskop* (модифицирано од [80])

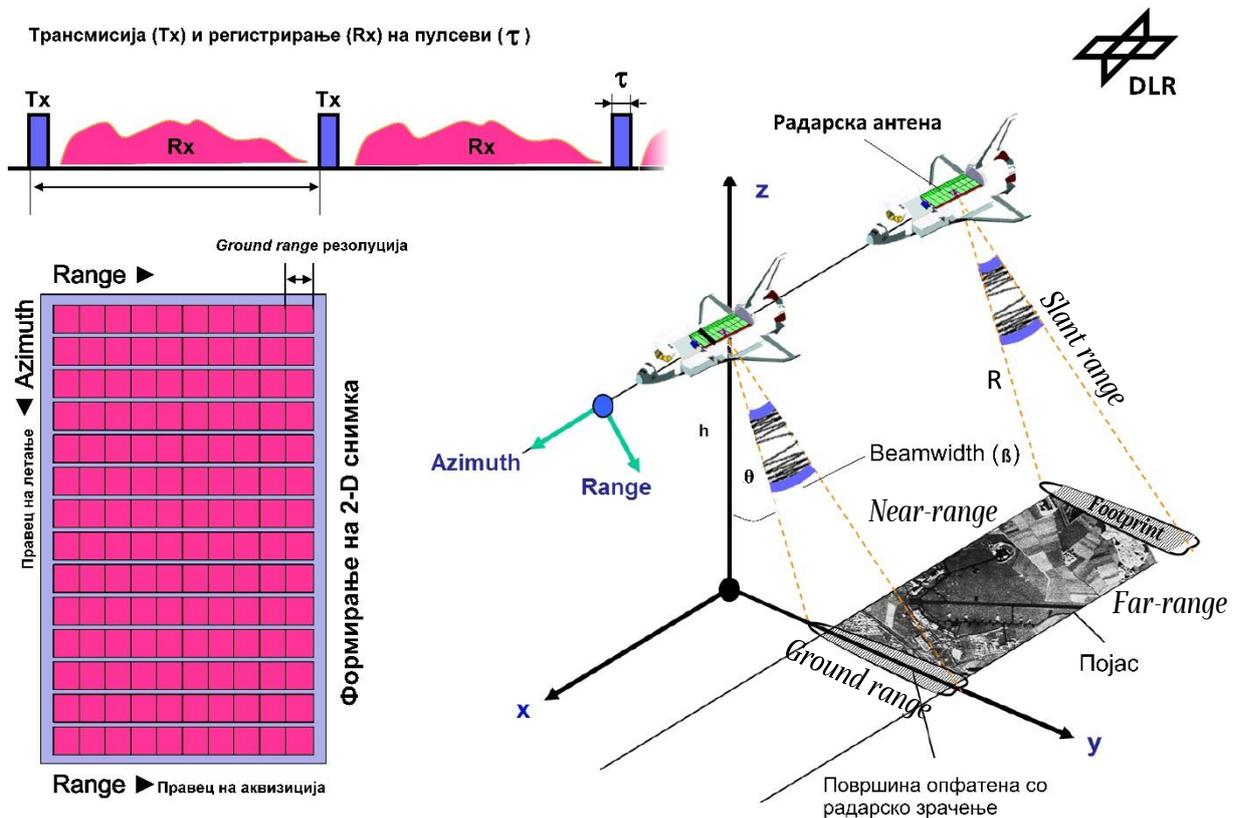
Развојот на радарската технологија доживува значителна експанзија во периодот на двете светски војни, кога се појавува зголемена потреба за навремена детекција на непријателски летала и пловни објекти. Во овој период, радарот се трансформира од експериментален систем во критична оперативна технологија со стратешко значење. Посебен придонес во развојот на радарската технологија има *Роберт Вајсон Вај*, кој во 1935 година го патентира „*Methoden zur Erfassung von Radiosignalen zur Ortung von Objekten*“, што претставува еден од првите формално признати технолошки концепти за оперативен радарски систем. Врз основа на овој патент, за време на Втората светска војна е развиен системот „*Chain Home*“ кој претставувал мрежа од фиксни радарски станици наменети за рано предупредување и детекција на воздушни објекти. Терминот *RADAR* за првпат е формално воведен во 1939 година од Американската воено-поморска лабораторија (*U.S. Naval Research Laboratory*) и оттогаш се користи како универзален поим за сите технологии засновани на радиобранова детекција и мерење на оддалеченост. [7]

Со еволуцијата на радарската технологија, покрај системите за детекција и мерење на оддалеченост, започнуваат да се развиваат и т.н. *сликовни радар* (*imaging radars*), чија цел е не само да се детектира присуство на објекти, туку и да се добијат детални просторни информации за нивната форма, големина и структура. За разлика од класичните радар, кои главно обезбедуваат податок за растојание и брзина, сликовните радар овозможуваат создавање на дводимензионални снимки на набљудуваните површини, што претставува значаен чекор кон развојот на просторната аквизиција. [19]

2.1.2 Основни карактеристики на сликовните радары

Радарските сликовни системи се издвојуваат по својата способност за континуирано набљудување на површината на Земјата, без оглед на временските услови или осветленоста. Оваа независност произлегува од фактот што радарите претставуваат **активни сензори**. Тие самостојно генерираат и емитураат електромагнетни сигнали во радио и микробрановото подрачје од електромагнетниот спектар. Овие сигнали имаат способност да продираат низ облаци, дожд и магла, при што овозможуваат набљудување на површината и во услови на целосно отсуство на светлина, враќајќи се до сензорот по расејувањето од објектите на површината.

Кон крајот на 1940-тите и почетокот на 1950-тите години започнува примена на радарската технологија за мапирање на Земјината површина од воздушни платформи. Овој пристап доведе до развој на *авионски радары со странична аквизиција* (*Side-Looking Airborne Radar – SLAR*), кои претставуваат првите практично употребливи радарски сензори за добивање сликовен приказ на теренот. Основните негови компоненти се: радарски предавател, приемник, процесор за сигналот и антена. [19] [88]



Слика 2 Шемајски приказ на аквизиција на радарски систем монитран на авион (модифицирано од [24])

За разлика од пасивните оптички сензори кои при аквизицијата се насочени вертикално и ја аквизираат Земјината површина врз основа на рефлектираната сончева светлина, радарските системи како активни сензори емитураат микробранови сигнали и го мерат времето потребно сигналите да се вратат по расејување од Земјината површина до сензорот. Насочувањето на антената под агол (θ) овозможува секоја точка од теренот да биде на различно растојание од сензорот, со што времето на враќање на сигналите директно се поврзува со растојанието во т.н.

range насока. Дополнително, поради движењето на авионската платформа, секој ново емитуван пулс ја опфаќа следната позиција долж траекторијата на летот, во т.н. *азимут* (*azimuth*) насока.

Принципот на аквизиција е прикажан на Слика 2, каде се илустрирани секвенцијалните емитувања на микробранови пулсови (T_x) и приемот на повратните расеани сигнали (R_x). Секое емитување покрива дел од теренот, а по приемот на ехо-сигналите, системот продолжува со следен пулс од нова позиција. Така, се создава дводимензионална матрица од податоци, каде редиците ја претставуваат еволуцијата на позицијата на сензорот долж траекторијата на летот во азимут насока, а колоните се пополнуваат со регистрираните сигнали според времето на нивното пристигнување, од блиските (*near-range*) кон подалечните (*far-range*) точки во насока на аквизиција. Ваквиот временско-просторен распоред овозможува прецизна просторна дискретизација на сцената и претставува основа за секоја сликовна радарска аквизиција. [24]

Димензиите на осветлената површина (*footprint*) при секој испратен радарски пулс зависат од брановата должина на сигналот, димензиите на антената и растојанието од сензорот до површината на Земјата (R). Антените кај сликовните радарски системи, како *SLAR* или *SAR*, обично имаат правоаголна форма со значително поголема должина отколку ширина (често однос 10:1 или повеќе) и се монтираат така што нивната подолга страна е паралелна со правецот на летот.

Во *range* насока, ширината на радарскиот сноп, односно неговата аголна отвореност (*beamwidth*), се определува според релацијата (68):

$$\beta_\rho = \frac{\lambda}{W} \quad (1)$$

Каде:

β_ρ - Аголната ширина на снопот (*beamwidth*) во *range* насока;

λ - Бранова должина на сигналот;

W - Ширината на антената во правец нормален на летот.

Димензијата на осветлениот појас во *range* насока се добива како производ на ширина на снопот (β_ρ) со растојанието од сензорот до површината на Земјата (R).

Соодветно, во *azimuth* насока аголната ширина на снопот (*beamwidth*) се определува согласно релацијата (2):

$$\beta_{Az} = \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

Каде:

β_{Az} - Аголна ширина на снопот (*beamwidth*) во *azimuth* насока;

λ - Бранова должина на сигналот;

L - Должина на антената во правец на летот.

Идентично како и кај *range* насока, димензијата на осветлениот појас во *azimuth* насока се добива како производ на ширина на снопот (β_{Az}) со растојанието од сензорот до површината на Земјата (R) [88].

2.1.3 Просторна резолуција на радарските системи

Резолуцијата на радарските системи е различна во двете главни насоки, *range* и *azimuth*.

Резолуцијата во *range* насока, поточно во *slant range*², или во *правецој на аквизиција (Line of Sight)*, се однесува на способноста на радарскиот систем да разликува два објекти што се наоѓаат на различни растојанија од сензорот, по должина на правецот на аквизиција. Кај сликовните радарски системи кои работат на принцип на емисија на кратки радарски пулсови, оваа резолуција зависи од времетраењето на емитираниот пулс, односно од неговата просторна должина, која се изразува со релацијата (3):

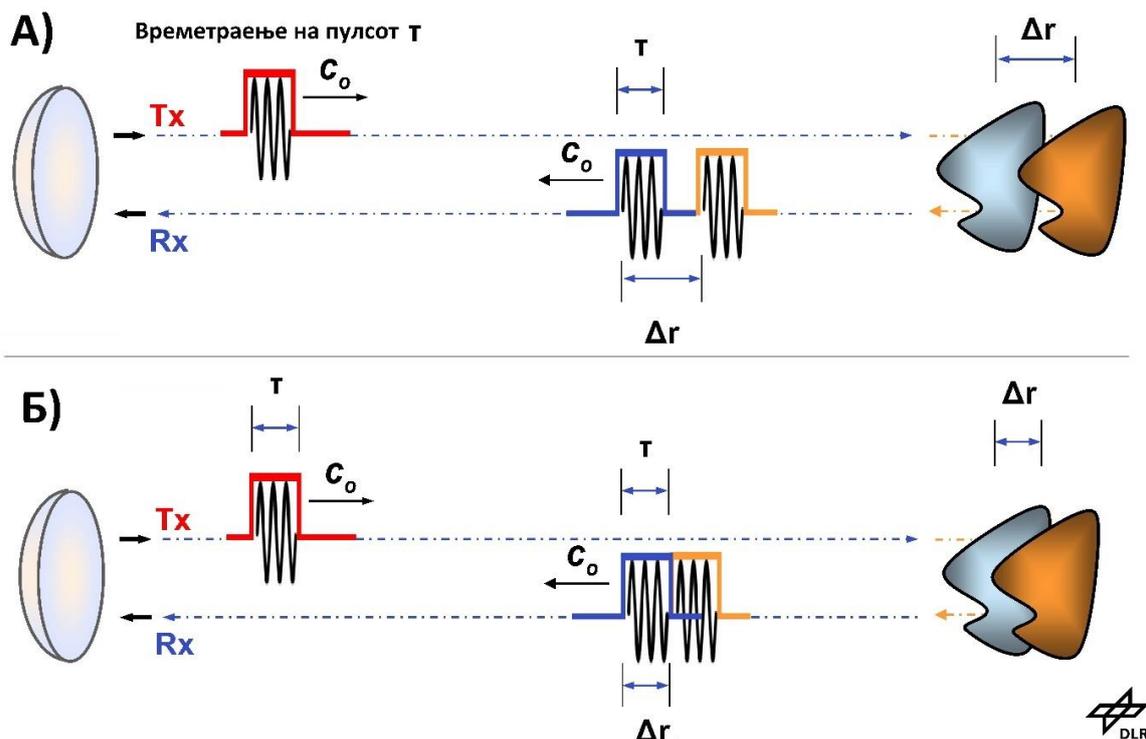
$$\delta_r = \frac{c_0 \cdot \tau}{2} [m] \quad (3)$$

Каде:

δ_r – Резолуција во *range* насока;

c_0 – Брзина на светлината;

τ – Времетраење на емитираниот пулс.



Слика 3 Резолуцијата во *range* насока: А) два објекти што се разликуваат поради меѓусебна оддалеченост; Б) два објекти што се прикажуваат како еден поради нивната близина. (модифицирано од [24])

Факторот $\frac{1}{2}$ во релацијата (3) се јавува поради тоа што сигналот патува двонасочно, од антената до површината и назад. Времето што го мери системот всушност го опфаќа целиот пат, па затоа во

² Во контекст на радарските системи, терминот „*range*“ најчесто се однесува на косото растојание (*slant-range*), т.е. растојанието по правецот на аквизиција од сензорот до точка на површината, а не на хоризонталната проекција на тоа растојание.

пресметката на растојанието се зема половина од вкупното време. Овој принцип е илустриран на Слика 3. Бидејќи брзината на светлината е константна, единствениот начин да се подобри резолуцијата во *range* насока е преку скратување на времетраењето на пулсот (τ), односно преку намалување на неговата должина.

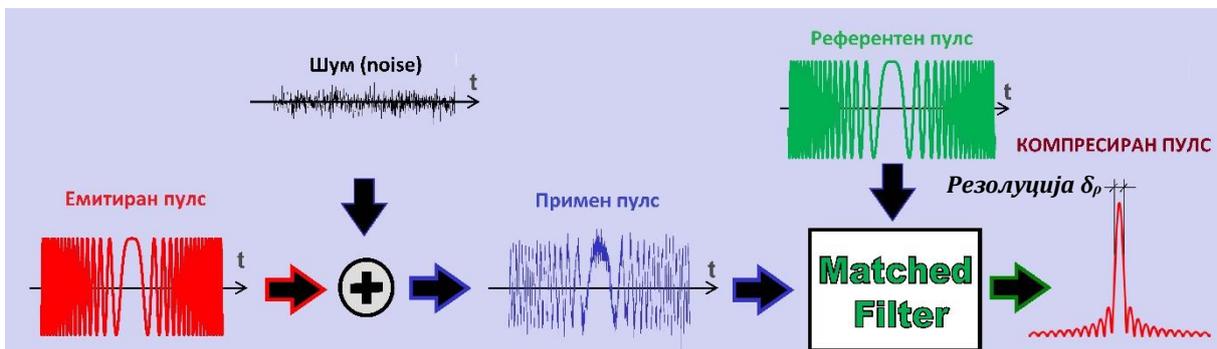
Иако пократките радарски пулсови овозможуваат подобра просторна резолуција во *slant-range* насока, постојат технолошки и физички ограничувања што го ограничуваат нивното скратување. Имено, енергетскиот капацитет на многу краток пулс е недоволен за да обезбеди доволно јак повратен сигнал по пристигнување од двонасочната патека. Со други зборови, со намалување на времетраењето на пулсот, се намалува и вкупната енергија што се испраќа, која доведува до помало повратно расејување (*backscatter*) и до поголем шум во сигналот. За да се надминат овие ограничувања, во практичните SAR системи се применува техниката на *пулсна компресија* (*pulse compression*), која овозможува комбинирање на висока енергетска содржина и висока просторна резолуција. Во оваа техника, наместо скратување на пулсот, се емитува долг *фреквенцисно модулиран пулс* (*chirp*), а потоа примениот сигнал се обработува преку т.н *филиер на совпаѓање* (*matched filter*), кој врши вкрстена корелација на примениот сигнал со референтниот (реплика од испратениот) сигнал. На тој начин, се постигнува временска компресија на сигналот и зголемена резолуција, без загуба на енергија. Практично, во овој случај резолуцијата не зависи директно од времетраењето на пулсот (τ), туку од неговиот *фреквенциски опсег* (*bandwidth*). Фреквенцискиот опсег претставува разликата помеѓу најниската и највисоката фреквенција на еден радарски сигнал, односно колку различни фреквенции се опфатени во рамките на еден пулс. За разлика од класичните кратки сигнали со константна фреквенција, модерните радарски системи користат фреквенцисно модулирани (*chirp*) сигнали. Бидејќи фреквенцискиот опсег и времетраењето на пулсот се обратно пропорционални, кога оваа зависност се примени во релацијата (3), се добива дефинитивниот израз за просторната резолуција во *range* насока. [119] [80] [99]

$$\delta_r = \frac{c_0}{2 \cdot B_w} [m] \quad (4)$$

Каде:

B_w – Фреквенциски опсег (*bandwidth*) на емитираниот пулс.

Процесот на компресирање на пулсот е прикажан на Слика 4.



Слика 4 Процес на компресија на емитираниот пулс (модифицирано од [24])

Релацијата (4) покажува дека поголемиот фреквенциски опсег (B_w) на сигналот овозможува подобра резолуција. Зголемувањето на фреквенцискиот опсег е технолошки изводливо со примена на техники како фреквенцисна модулација (*chirp*). Тоа овозможува добивање на просторна

резолюција од неколку метри. Многу важна карактеристика на радарските системи е тоа што резолуцијата не зависи од растојанието помеѓу сензорот и целната површина, бидејќи согласно релацијата (4) истата зависи само од брзината на светлината и од фреквенцискиот опсег. Ваквиот пристап е особено погоден за употреба кај сензори поставени на сателитски платформи, каде што орбиталните височини можат да достигнат и неколку стотици километри. [119] [24]

Релацијата (4) се однесува на способноста на радарскиот систем да разликува објекти во правецот на аквизиција (*Line of Sight*), односно во *slant range* насока. Сепак, од аспект на далечинската детекција, значајна е *ground range* резолуцијата, бидејќи објектите од интерес се проектираат врз хоризонталната референтна рамнина на теренот. Резолуцијата во *ground range* насока ($\delta_{\rho_{Gr}}$) се добива како проекција на резолуцијата во *slant range* насока врз основа на аголот на аквизицијата (θ), согласно следнава релација:

$$\delta_{\rho_{Gr}} = \frac{\delta_{\rho}}{\sin \theta} [m] \quad (5)$$

Од релацијата (5) може да се заклучи дека како што се зголемува аголот на аквизиција (θ), односно со оддалечувањето од вертикалната оска на сензорот (надир), *ground range* резолуцијата се подобрува. Тоа значи дека објектите кои се наоѓаат во подалечните делови од појасот на радарската снимка може полесно да се разликуваат, бидејќи нивната проекција на Земјината површина е појасно дефинирана. Овој тренд е спротивен на она што се забележува кај оптичките сензори, кај кои резолуцијата обично се намалува со зголемување на аголот на гледање. Притоа, важно е да се потенцира дека *ground range* резолуцијата претставува проекција на *slant range* резолуцијата врз рамна референтна (идеализирана) површина. Меѓутоа, кога се аквизира реален терен кој отстапува од оваа површина, како што е случај кај планински предели, локалниот наклон на површината го менува аголот на аквизиција. Ова доведува до варијации во локалната *ground range* резолуција. Така на пример, на спротивната страна од планина, каде аквизицискиот агол е поголем, добиената резолуција ќе биде подобра отколку на страната поблиску до сензорот. Овие геометриски варијации се причина за дисторзии на радарските снимки, тема што е подетално обработена во глава 2.2.4 Дисторзии на SAR снимките.

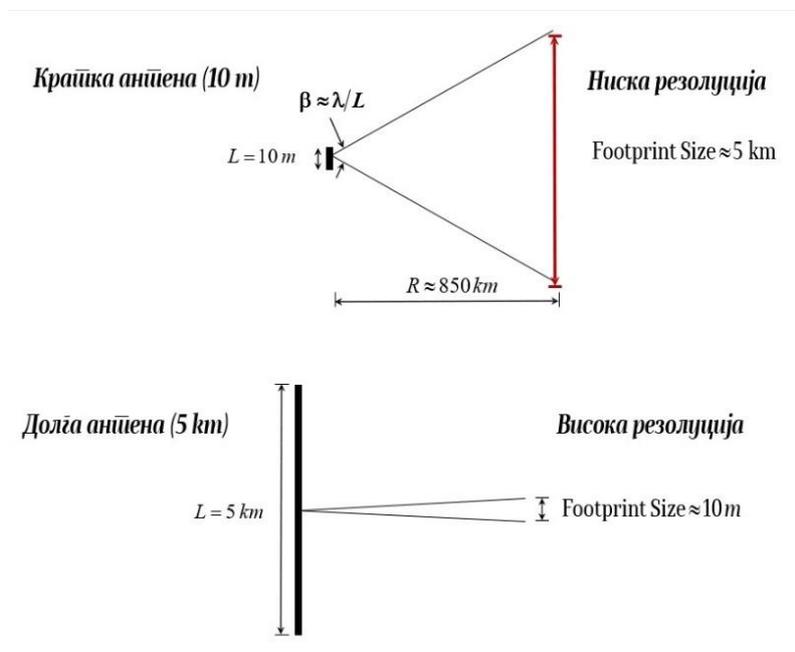
Резолуцијата во *azimuth* насока (азимутална резолуција), односно по должина на патеката на движење на радарскиот систем, се однесува на неговата способност да разликува два објекти кои се наоѓаат еден до друг во правецот на летот. Кај класичните радарски системи (*SLAR*), азимутната резолуција е одредена од ширината на антенскиот сноп во таа насока, која зависи од физичката должина на антената поставена паралелно со правецот на движење. Согласно веќе изнесената релација (2), ширината на снопот е обратно пропорционална на должината на антената (L), па така, со зголемување на таа должина, се добива потесен сноп и подобра азимутална резолуција. Азимуталната резолуција всушност претставува димензијата на осветлениот појас во *azimuth* насока при последователните емитувања на микробранови пулсови и се изразува согласно следнава релација (6):

$$\delta_{AzR} = \frac{\lambda}{L} \cdot R [m] \quad (6)$$

Азимутната резолуција дефинирана со релацијата (6) зависи од трите основни параметри: брановата должина на сигналот (λ), должината на антената (L) и растојанието до Земјината површина (R). Иако сите три компоненти имаат влијание врз азимуталната резолуција, брановата должина е најчесто однапред дефинирана со оглед на избраниот фреквенциски опсег (на пр., X , C ,

или *L-band*), кој се избира во фазата на дизајн на системот според апликацијата и технолошките ограничувања. Поради тоа оптимизирањето на азимутната резолуција кај класичните *SLAR* системи се заснова на модифицирање на растојанието од сензорот до Земјината површина и должината на антената. [19]

Ако се земе предвид растојанието до Земјината површина (R) како параметар, тогаш при аквизиција од пониски височини, само со користење на авионски платформи, може да се постигне прифатлива азимутална резолуција. Меѓутоа, кога радарскиот систем е монтиран на сателит кој орбитира на височина од приближно 800 до 850 *km*, резолуцијата значително се влошува поради големото растојание од сензорот до површината. На Слика 5 е прикажана ваква ситуација, каде што при должина на антената од десет метри и *C-band* бранова должина (5.6 *cm*), азимуталната резолуција изнесува приближно пет километри, што е недоволно за повеќето апликации во областа на далечинската детекција. Во таков контекст, единствениот параметар што би можел да се модифицира со цел подобрување на оваа резолуција е должината на антената. Сепак, за да се надомести ефектот од големото растојание, би била потребна антена со должина од неколку километри, што е конструктивно и оперативно неизводливо.



Слика 5 Приказ на простиорната резолуција во азимут насока на крајка и долга радарска антена [81]

Иако класичните радарски системи овозможуваат сликовна аквизиција со прифатлива резолуција кога се поставени на авионски платформи на пониски височини, нивната примена на сателитски височини се соочува со сериозни ограничувања, особено во однос на азимуталната просторна резолуција. Зголемувањето на висината резултира со влошена азимутална резолуција, односно со намалена способност за разликување објекти еден до друг во насока на движење. Сепак, сателитските платформи се незаменливи кога станува збор за глобално и долгорочно набљудување, особено во непристапни или метеоролошки неповолни подрачја. За да се надминат овие ограничувања, развиен е концептот *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, систем кој наместо да се потпира само на физичката должина на антената, ја користи брзината на движење на платформата и кохерентната обработка на повратните сигнали за да симулира подолга антена. На овој начин се овозможува значително подобрување на азимуталната резолуција, дури и од орбитални височини.

На Слика 6 графички е претставена основната идеја на SAR концептот. Радарската аквизиција се реализира така што платформата на која е инсталиран SAR сензорот се движи по однапред дефинирана траекторија и притоа испраќа последователни линеарно фреквентно модулирани импулси (*chirp* сигнали) и истовремено ги регистрира нивните повратни расејувања. Поради континуираното движење на сензорот, еден ист расејувач се опфаќа со повеќекратни набљудувања од различни позиции, од првата точка на видливост до последната. Како резултат, за секој расејувач се добива временска серија на повратни сигнали, секој со карактеристична Доплерова фреквенција. Во фазата на постобработка, овие сигнали се комбинираат со посебни алгоритми за фокусирање, при што се создава синтетичката антена.

Азимуталната резолуција со користење на SAR концептот, се изразува согласно релацијата:

$$\delta_{Az} = \frac{\lambda}{2 \cdot L_{SA}} \cdot R_0 [m] \quad (7)$$

Каде:

L_{SA} – Должина на продолжената антена (синтетичка антена);

R_0 – Средно растојание до расејувачот.

Релацијата (7) во споредба со релацијата (6) која се однесува на класичните радарски системи, се разликува не само во начинот на дефинирање на должината на антената, туку и поради присуството на факторот 2 во именителот. Овој фактор произлегува од фактот што секој расејувач на теренот е набљудуван од двете страни на синтетичката антена, односно при приближување и при оддалечување на SAR платформата. Таквиот двостран набљудувачки агол овозможува поефикасно фокусирање, што резултира со двојно подобра азимутална резолуција во однос на класичен систем со реална антена од иста должина. [119]

Должината на синтетичката антена (L_{SA}), односно патеката по која расејувачот е „видлив“ од радарот, може приближно да се изрази со следнава релација:

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{\beta_{Az}} \cdot R_0 [m] \quad (8)$$

Каде:

β_{Az} - Аголната ширина на снопот (*beamwidth*) во *azimuth* насока изразена во релација (2) како $\frac{\lambda}{L}$;

Доколку изразот за должината на синтетичката антена (L_{SA}) од релација (8) се замени во релацијата (7) се добива дефинитивната релација за азимуталната резолуција кај SAR концептот:

$$\delta_{Az} = \frac{L}{2} [m] \quad (9)$$

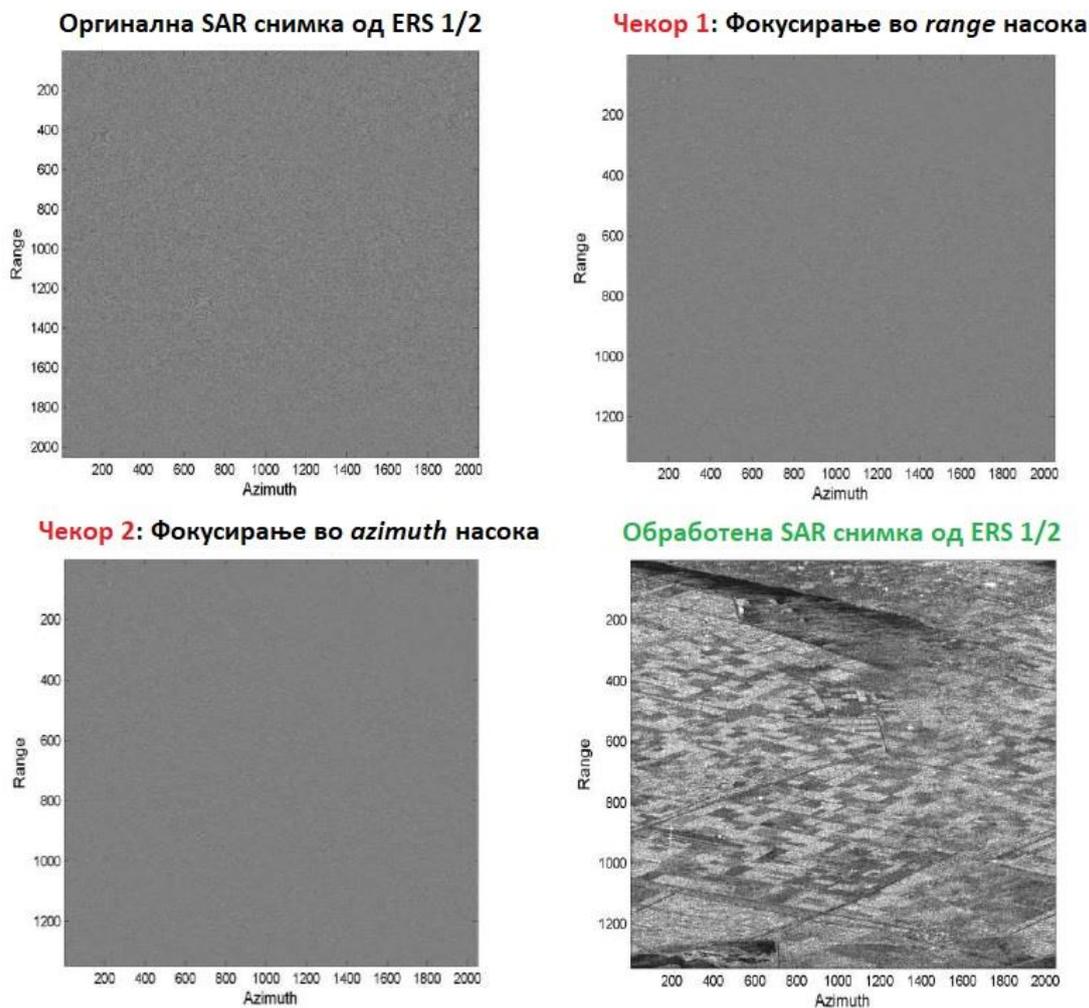
Оваа релација покажува дека, под оптимални услови за обработка и фокусирање, **азимуталната резолуција кај SAR не зависи од растојанието до расејувачот** и се сведува на **половина од физичката должина на антената**. Тоа претставува едно од најголемите предности на SAR системите во однос на класичните SLAR системи, кај кои резолуцијата опаѓа со зголемување на растојанието до целта. [19] [119]

Основниот принцип на синтетичка антена претставува темел на сите современи SAR системи, иако денес постојат разновидни модификации на овој концепт со цел да се оптимизира резолуцијата на сликата (како кај *Spotlight SAR*) или покриеноста на теренот (како кај *ScanSAR*)

режимот на аквизиција). Современите сателитски SAR сензори овозможуваат просторна резолуција од приближно 0.5 до 20 метри по двете насоки, во зависност од дизајнот на системот и избраниот режим на аквизиција [84].

2.2.2 Формирање на SAR снимка

SAR сензорите аквизираат необработени снимки, кои обично се нарекуваат *Level-0* податоци, кои содржат регистрирани повратни сигнали од повеќе последователни набљудувања на истата површина. Начинот на аквизиција кај SAR сензорите е сличен со оној кај класичните сликовни радары (SLAR), особено во *range* насоката, каде што резолуцијата зависи од ширината на испратениот модулиран сигнал и е опишан со релација (4). Меѓутоа, клучната разлика лежи во азимуталната резолуција. Кај SLAR таа зависи од физичката должина на антената, а кај SAR таа се подобрува преку креирање на синтетичката антена. [19]



Слика 7 Процесирање на SAR снимка со фокусирање во двете насоки (модифицирано од [81])

Резултатите од постобработката на SAR аквизираните податоци се графички прикажани на Слика 7. Процесот на формирање на фокусирана SAR снимка обично се реализира во два последователни чекори: фокусирање (компресија) во *range* насока и фокусирање во *azimuth* насока.

Во првиот чекор, се врши *range*-компресија, со што се подобрува резолуцијата во *range* насоката. За таа цел се применува т.н. филтер на совпаѓање (*matched filter*), кој е дизајниран врз основа на обликот на пренесениот фреквентно модулиран (*chirp*) сигнал (види Слика 4). Овој филтер овозможува прецизна идентификација на позицијата на секој расејувач по должината на правецот на аквизиција. [24]

Во вториот чекор се спроведува *azimuth*-компресија, која во принцип е аналогна на претходната. Секој расејувач се набљудува од различни позиции на SAR сензорот и се карактеризира со специфична Доплерова фреквенција, која зависи од неговата релативна положба. Со примена на азимутален филтер на совпаѓање (*matched filter*), кој ја моделира Доплеровата историја (т.е. фазниот развој) на расејувачот, се овозможува фокусирање во азимут насоката. [84] [100]

На овој начин се добива SAR снимка со висока просторна резолуција, во рамки на т.н. *Level-1* продукт, кој се испорачува во формат *SLC* (*Single Look Complex*). Овој формат содржи комплексни вредности во секој пиксел, при што секоја снимката е претставена како матрица од комплексни броеви. Благодарение на таа комплексна структура на податоците, *SLC* снимките се особено погодни за интерферометриски апликации како што е *InSAR*, каде фазната стабилност и кохерентноста играат клучна улога во откривањето на “тивки” поместувања на Земјината површина. [53] [84]

За да се долови целосниот потенцијал на овие податоци, во продолжение се разгледуваат основните карактеристики на SAR снимката.

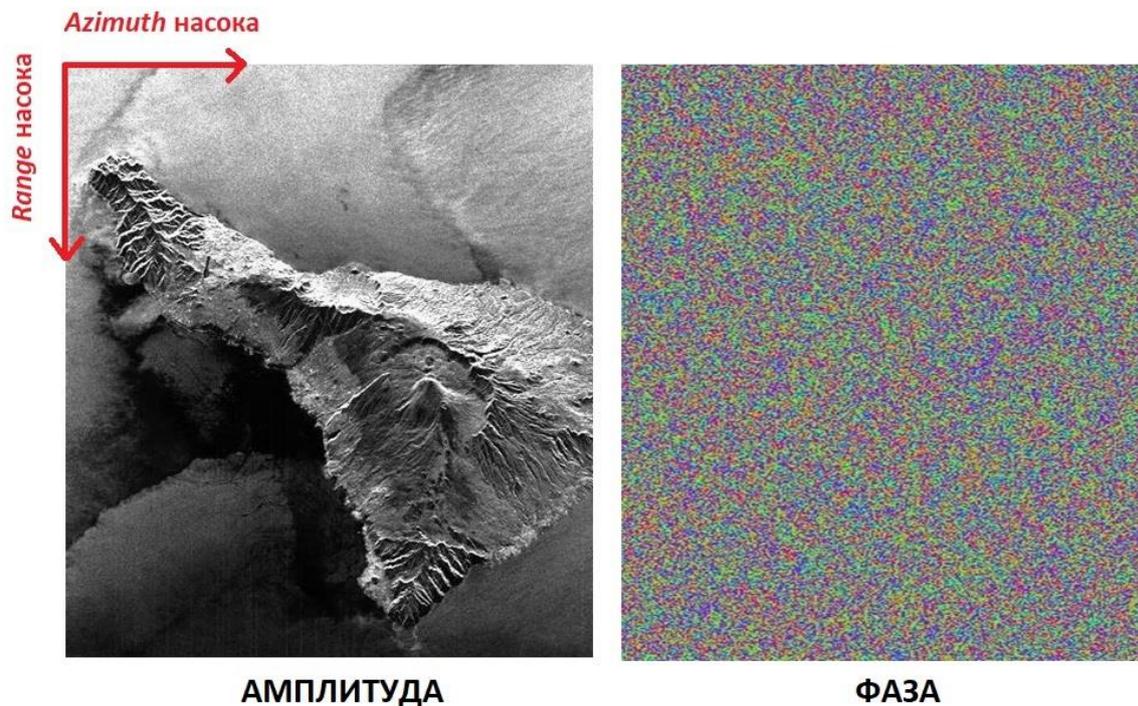
2.2.3 Карактеристики на SAR снимката

SAR снимката во стандардниот *SLC* формат содржи информации во форма на комплексни броеви за секој нејзин пиксел. Поточно, во секој пиксел се содржани информации за комплексна радарска рефлективност од повратното расејување. Покрај *SLC* форматот, кој претставува стандарден и најсодржаен SAR формат, постојат и други видови продукти со различен степен на обработка и намена и тоа:

- *GRD* (*Ground Range Detected*). Овој продукт е резултат на понатамошна обработка на *SLC* податоците, каде фазата е отстранета, а амплитудата е проектирана во *ground range* координатен систем. Овој формат е погоден за визуелна анализа, класификација и мониторинг на промени, но не е употреблив за *InSAR* анализи.
- *OCN* (*Ocean*). Специјализиран продукт за апликации поврзани со океанографија, каде се изведуваат параметри како брзина на ветер или бранови на морската површина.
- *RAW* (*Level-0*). Веќе ги споменавме необработените сурови податоци, директно добиени од сензорот. Овие податоци не се веднаш употребливи за анализа и бараат специјализиран процес на обработка (фокусирање во *range* и *azimuth* насока) за да се добие финална SAR снимка. Овие податоци се достапни преку овластените дистрибутивни центри и се наменети за истражувачи и институции кои сакаат самостојно да го извршат процесот на формирање на SAR снимката, со цел поголема контрола врз обработката. [29] [30]

Комплексната вредност во секој пиксел од SAR снимката, претставува збир од **амплитудна компонента**, која го опишува интензитетот на **повратното расејување** (*backscatter*) и **фазна компонента**, која ја носи информацијата за **распојанието помеѓу сензорот и целта**, како и

начинот на интеракција на електромагнетниот бран со површината. Координатите на секој пиксел се дефинирани во *range-azimuth* координатниот систем. *Range* насоката е нормална на патеката на сателитот, додека *azimuth* насоката ја следи неговата орбита по која се движи сателитот. Оваа геометриска поставеност е директно поврзана со начинот на аквизиција и игра важна улога при интерпретацијата и геореференцирањето на снимките.



Слика 8 Приказ на SAR снимка, со амплитудниот и фазниот информации и SAR координатниот

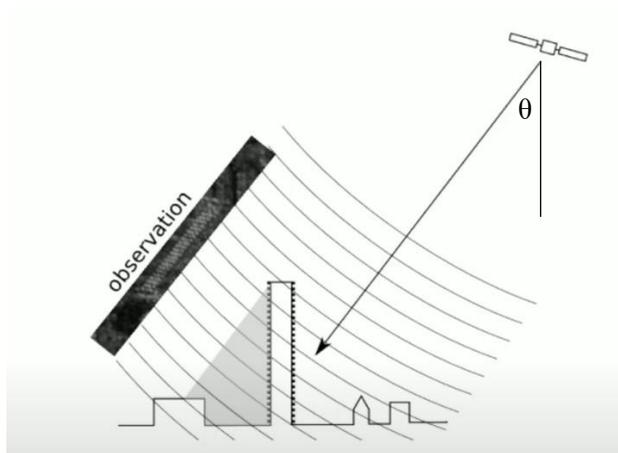
Од Слика 8 може да се забележи дека амплитудниот слој од SAR снимката овозможува визуелна интерпретација на теренот, каде што геометријата, топографијата и структурата на површината се релативно лесно препознатливи. Наспроти тоа, фазниот слој изгледа како случаен мозаик од бои и не може интуитивно да се протолкува, особено без примена на соодветна интерферометриска обработка. Но, иако амплитудата на SAR снимката овозможува проценка на некои физички карактеристики на површината, од аспект на интерферометриската анализа највредната информација е содржана во фазата. Таа носи податоци за релативни промени во патот на сигналот и со соодветна обработка се добиваат информации за поместувањето на Земјината површина.

Оваа разлика јасно покажува дека интерпретацијата на SAR снимките битно се разликува од визуелното перцепирање на фотографии или оптички сателитски слики, кои се базираат на количеството на регистрирана рефлексија на светлината во видливиот спектар и се усогласени со начинот на кој човековото визуелно сетило ја доживува околината. За разлика од тоа, радарските снимки се резултат на кохерентна обработка на електромагнетно зрачење со многу подолга бранова должина (во микробрановата област), каде повратниот сигнал зависи од комплексна интеракција со површината, вклучително и нејзината текстура, влажност, агол на аквизиција и диелектрични својства.

2.2.4 Дисторзии на SAR снимките

И покрај високата просторна резолуција на SAR технологијата, добиените снимки се подложни на различни видови дисторзии, кои произлегуваат од самата геометрија на аквизирањето и физичките ограничувања на системот. Дисторзиите можат да се поделат на *геометриски* и *радиометриски*, при што и двете имаат различно влијание врз интерпретацијата и обработката на податоците.

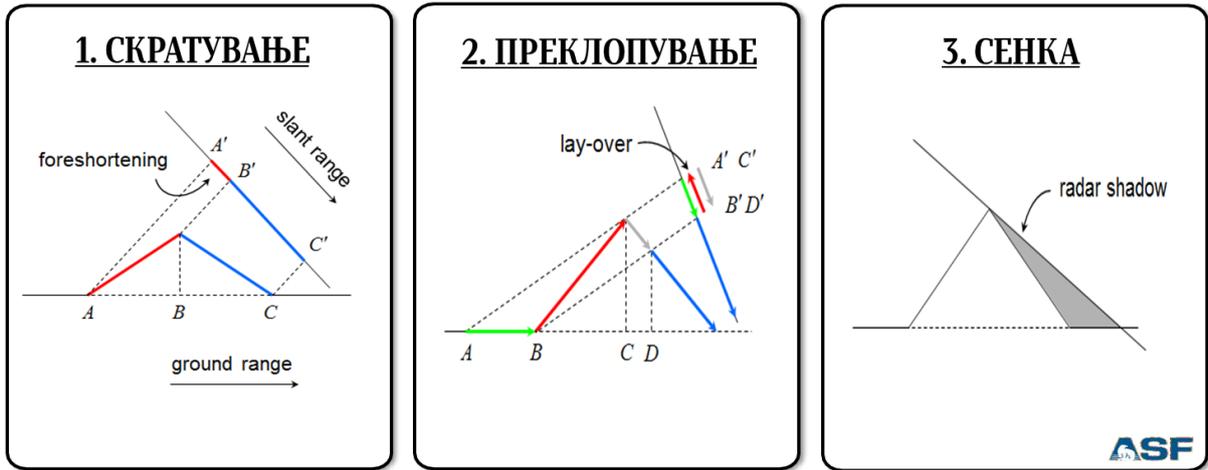
Геометрискиите дисторзии се резултат на страничниот агол (θ) на аквизиција на SAR сензорот, кој доведува до неправилно проектирање на тродимензионалната површина на двумензионалната слика (Слика 9).



Слика 9 Аквизирање на SAR снимка со странична аквизиција под агол (θ) [103]

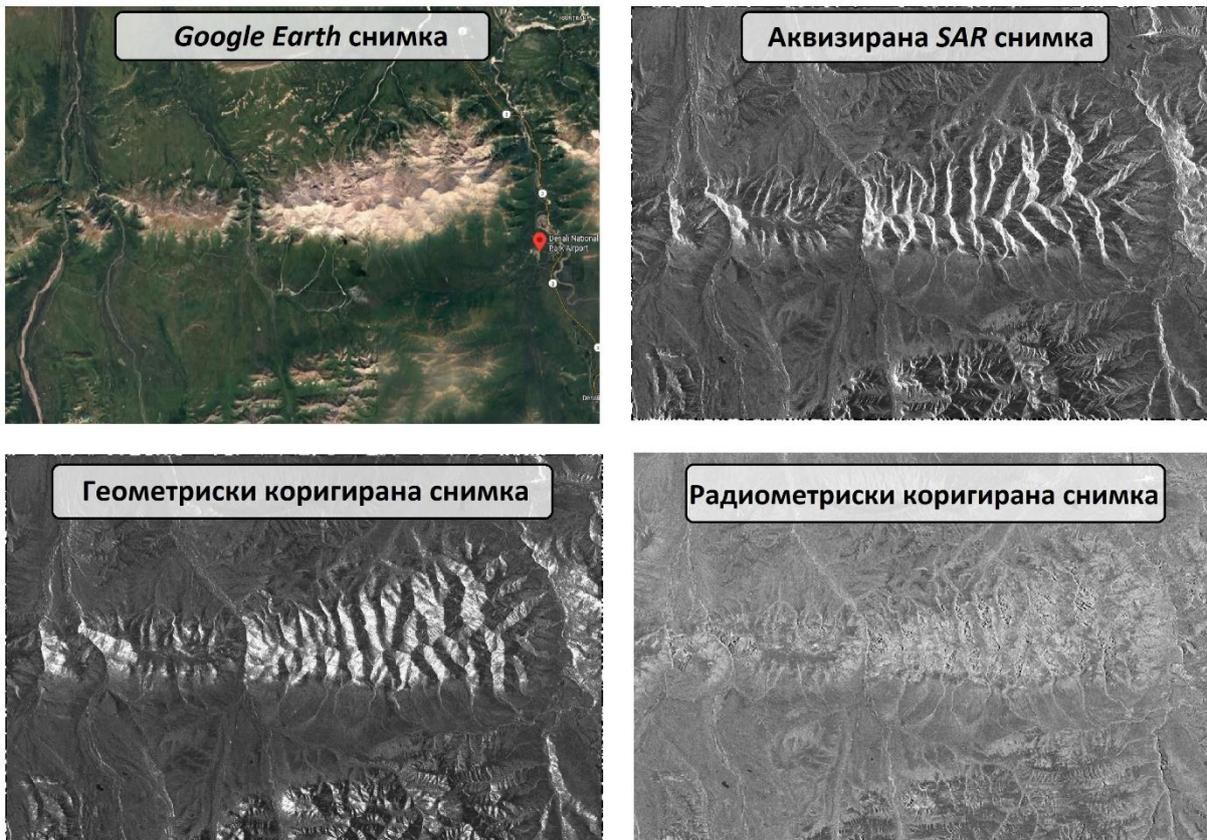
Главните форми на геометриска дисторзија се:

1. *Скратување (Foreshortening)*, се појавува кога косината на топографијата на теренот (на пр. косина на планина) се ориентирани под прав агол во однос на правецот на аквизиција. Притоа нивната реална должина се проектира на пократка дистанца во снимката. Овој ефект резултира со визуелна компресија на површинските структури. Интензитетот на скратување зависи од односот меѓу аголот на наклонот на теренот и аголот на аквизиција на сензорот. (Слика 10-1).
2. *Преклопување (Layover)*, настанува кога највисоката точка на теренот (на пр. врв на рид или зграда) е поблиску до сензорот отколку неговата основа. Во таков случај, сигналот што се одбива од врвот пристигнува до сензорот пред сигналот од подножјето, па тие се проектираат на исто или слично место во снимката. Ова предизвикува преклопување на податоците, губење на просторна дистинкција и погрешна интерпретација на релјефот. Овој ефект е особено изразен кај стрмни планински падини и високи вештачки структури (Слика 10-2).
3. *Сенка (Shadowing)*, се јавува кога теренот е наклонет во спротивна насока од правецот на аквизиција на сензорот, односно кога зад некоја повисока формација се создава „радарска сенка“. Во овие области нема повратно расејување на сигналот кон сензорот, односно емитираниот сигнал не допира до „скриените“ области и тие се појавуваат како темни зони на SAR снимката (Слика 10-3). [8] [18] [119]



Слика 10 Приказ на геометрискиите дисторзии, 1. Скратување, 2. Преклопување и 3. Сенка [80]

Радиометрискиите дисторзии се поврзани со нееднаквото распределување на возвратената енергија при повратното расејување поради топографија на теренот или агол на аквизиција. Тие влијаат врз амплитудната информација и ја нарушуваат реалната радиометриска конзистентност на снимката. На пример, области со ист физички состав можат да изгледаат различно осветлени само поради нивната ориентација кон сензорот или поради скратување. Радиометриската корекција обично е потребна како предуслов за квалитетна анализа на површинските својства, особено кај апликации како класификација или проценка на површинска влажност. [8] [108]



Слика 11 Приказ на оригинална аквизиција, геометриски и радиометриски коригирана (модифицирано од [81])

2.2.5 Преглед на SAR сателитските мисии

SAR сателитите претставуваат вештачки платформи опремени со SAR сензор, чија основна цел е систематско и долгорочно прибирање на снимки од Земјината површина, независно од временските услови и осветленоста. Првите оперативни мисии од овој тип беа *ERS-1* (1991) и *ERS-2* (1995) на Европската вселенска агенција (*ESA*), кои емитураа *C-band* ($\lambda \approx 5.6 \text{ cm}$) сигнали и беа првенствено насочени за мониторинг на морските површини, поларните региони и глечери. Отворената политика за дистрибуција на податоците, во комбинација со можноста за набљудување и на копнените подрачја, овозможи значителен напредок во научните истражувања, особено во областа на SAR интерферометријата. [28] [111] [77]

Еден од најзначајните современи системи е констелацијата ***Sentinel-1*** на *ESA*, дел од европската програма *Copernicus*. Таа вклучува ***Sentinel-1A*** (лансиран на 3 април 2014 г.) и ***Sentinel-1C*** (лансиран на 5 декември 2024 г.), додека ***Sentinel-1B*** (2016) престана да функционира во декември 2021 г. по дефект во напојувањето и официјално беше исклучен од употреба во август 2022 г. Во почетокот на ноември 2025 година е планирано лансирање на новиот ***Sentinel-1D***. Сите *Sentinel-1* сателити користат *C-band* SAR сензор кој поддржува повеќе режими на снимање:

- *Interferometric Wide Swath (IW)* – просторна резолуција од приближно 5 m во *range* насока и 20 m во азимут, со ширина на појас на снимање од околу 250 km;
- *Extra Wide Swath (EW)* – просторна резолуција од приближно 20 m во *range* насока и 40 m во азимут, со ширина на појас на снимање до 400 km;
- *Stripmap (SM)* – просторна резолуција од приближно 5 m во *range* насока и 5 m во азимут, со ширина на појас на снимање од околу 80 km;
- *Wave (WV)* – просторна резолуција од приближно 5 m во *range* насока и 5 m во азимут, со покривање на сцени со големина од $20 \times 20 \text{ km}$, наменет за океанографски апликации. [30]

Податоците од *Sentinel-1* се достапни со отворен и бесплатен пристап, што ја прави оваа мисија клучен извор за апликации во геодинамика на урбани и планински средини, следење на инженерски објекти и слично. [32] [26]

Друг значаен современ систем е германската мисија ***TerraSAR-X***, развиена во партнерство меѓу *DLR* (Германската вселенска агенција) и *Airbus Defence and Space*. Сателитот беше лансиран на 15 јуни 2007 година и користи *X-band* ($\lambda \approx 3.1 \text{ cm}$) сигнали, обезбедувајќи исклучително висока просторна резолуција и геометриска точност. Поддржува повеќе режими на снимање:

- *Spotlight* – просторна резолуција до приближно 1 m во *range* насока и 1 m во азимут, со покривање на сцени со големина од околу $10 \times 10 \text{ km}$;
- *StripMap* – просторна резолуција од приближно 3 m во *range* насока и 3 m во азимут, со ширина на појас на снимање од околу 30 km;
- *ScanSAR* – просторна резолуција од приближно 18 m во *range* насока и 18 m во азимут, со ширина на појас на снимање од околу 100 km.

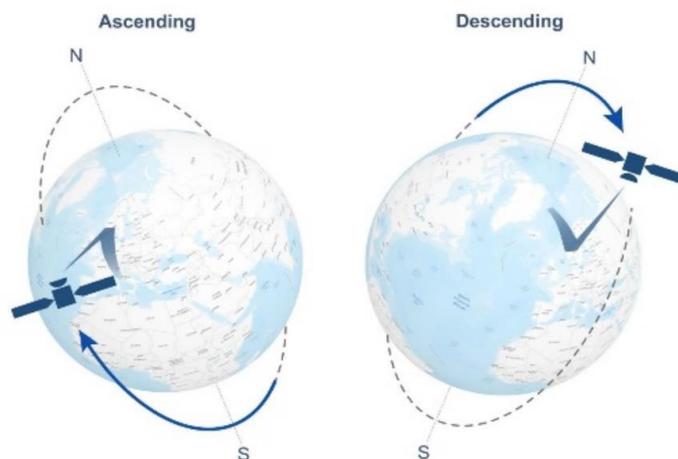
TerraSAR-X орбитира на висина од приближно 514 km. Во 2010 година му се придружи сателитот близанак *TanDEM-X*, со кој, во бистатичка конфигурација, беше изработен глобален дигитален модел на теренот (*TanDEM-X DEM*) со просторна резолуција од 12 m. [65] [66] [23]

Снимките од мисијата *TerraSAR-X* се комерцијални, при што нивната набавка бара финансиски надомест. Сепак, за научно-истражувачки цели, операторот на мисијата овозможува пристап до ограничен број снимки под одредени услови. Во рамките на ова истражување, такви снимки беа користени за напредните *InSAR* анализа на следење на урбаната зона од Скопската Котлина, со цел прецизно детектирање и квантитативна проценка на деформациските процеси.

Покрај *Sentinel-1* и *TerraSAR-X*, повеќе вселенски агенции имаат развиено значајни SAR мисии. Канадската *CSA* ја реализира серијата *RADARSAT*, која опфаќа повеќе генерации *C-band* сателити со примена во мониторинг на копнени и морски подрачја. Јапонската *JAXA* ги спроведува мисиите *ALOS*, базирани на *L-band* сензори, насочени кон истражување на вегетацијата, геодинамичките процеси и управувањето со природни ресурси. Италијанската *ASI* ја разви констелацијата *COSMO-SkyMed (X-band)*, која обезбедува висока резолуција и е наменета за широк спектар на апликации, од урбан мониторинг до набљудување на морски површини. Аргентинската *CONAE* ги реализира сателитите *SAOCOM (L-band)*, специјализирани за анализирање на густовегетирани површини.

Посебно треба да се истакне заедничката мисија на Национална аеронаутичко-вселенска агенција (*NASA*) и Индиската вселенска агенција (*ISRO*), наречена *NISAR*, кој претставува прв сателит кој комбинира *L-band* и *S-band* SAR сензори на иста платформа. Сателитот беше успешно лансиран во периодот на подготовка на оваа дисертација, а неговата целосна оперативност се очекува да биде од октомври 2025 година [85] [60]. Лансирањето на *NISAR* токму во овој период ја нагласува актуелноста и современоста за ова истражување, отворајќи нови можности за примена на напредни *InSAR* техники во глобален и регионален контекст.

Повеќето SAR сателити орбитираат на височина од 500–800 *km*, во блиско-поларна *Sun-synchronous* орбита со наклон од околу 97°–98° во однос на екваторот. Поради страничната геометрија на аквизиција кај SAR системите, снимањата при движењето на сателитот од север кон југ се означуваат како опаѓачка орбита (*descending*), а во спротивниот правец како растечка орбита (*ascending*). Аквизиите од двете орбити овозможуваат набљудување на истата област од различни насоки, со што се обезбедува покомплетна анализа на деформациските процеси. Бидејќи SAR системите користат странична геометрија на снимање, измереното поместување секогаш претставува проекција во насока на *LOS*. Комбинирањето на податоци од двете орбитални насоки овозможува декомпозиција на вкупното поместување на две главни компоненти, хоризонтална (најчесто исток–запад) и вертикална (горе–долу). [34] [53]



Слика 12 Илустрација на растечка (*ascending*) и опаѓачка (*descending*) орбити на SAR сателити [87]

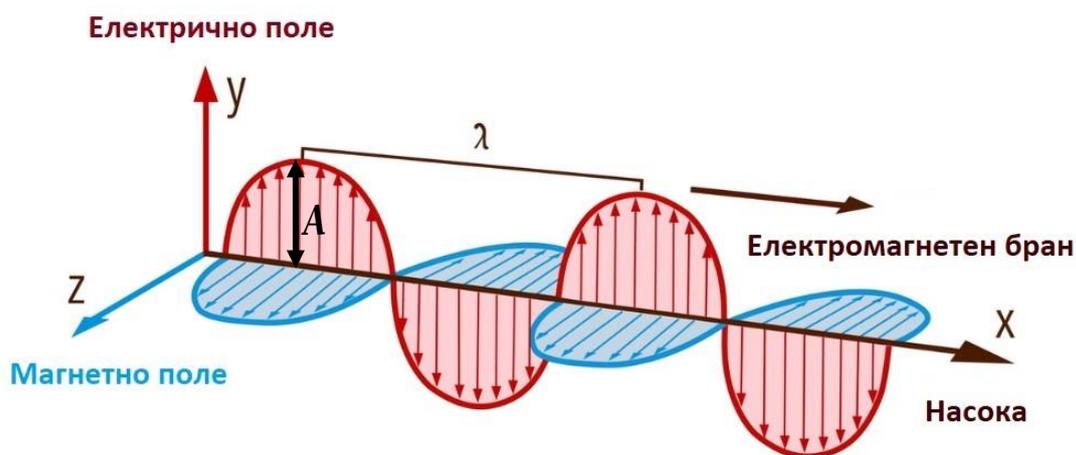
2.3 ФИЗИЧКИ СВОЈСТВА НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОТО ЗРАЧЕЊЕ

Со оглед на тоа дека фокусот на овој труд е ставен на примена на напредни интерферометриски техники, неопходно е подлабоко разбирање на природата и однесувањето на електромагнетните бранови, кои претставуваат основна компонента на радарските системи. Радарските технологии, вклучително и SAR сензорите, се засноваат на емитување и прием на кохерентни електромагнетни бранови во микробрановиот дел од електромагнетниот спектар, со точно дефинирана бранова должина и фреквенција.

Електромагнетното зрачење може да се опише како временски и просторно осцилирачко електрично и магнетно поле, кое патува со брзината на светлината. Овие две полиња се меѓусебно нормални и заедно осцилираат во просторот. Овој тип на зрачење се карактеризира со осцилаторно однесување и може да се опише преку различни математички модели. За да се поедностави теоретскиот пристап, електромагнетните бранови обично се моделираат како хармониски (синусоидални) бранови (Слика 13).

Основните параметри што го дефинираат секој електромагнетен бран се:

- **Фреквенција (f)**. Претставува број на осцилации во секунда. Се изразува во херци (Hz).
- **Бранова должина (λ)**. Претставува растојание меѓу два последователни пикови на електромагнетниот бран. Се изразува во метри (m).
- **Амплитуда (A)**. Претставува максималната јачина на електричното поле. Во SAR апликациите, наместо да се користи самата амплитуда, вообичаено се работи со интензитет на сигналот, кој е пропорционален на квадратот од амплитудата и претставува мерка за енергијата што се враќа од површината. Истото се изразува во децибели (dB).
- **Фаза (ϕ)**. Претставува аголна компонента што ја опишува положбата на брановата осцилација во даден момент. Се изразува во радијани (rad).
- **Поларизација**. Претставува рамнина на осцилација на електричното поле. [52] [119] [114]



Слика 13 Осцилација на електричното и магнетното поле на електромагнетната радијација

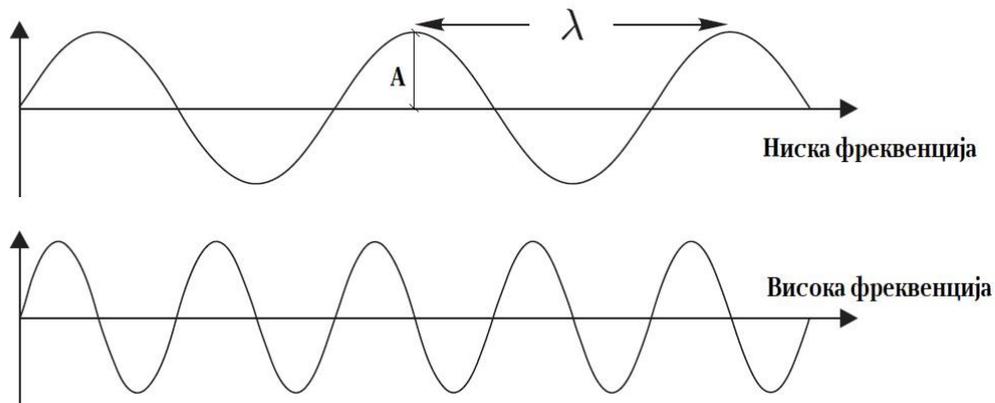
2.3.1 Фреквенција и бранова должина на електромагнетните бранови

Општо е познато дека електромагнетните бранови, вклучително и радарските сигнали, се движат низ вакуум со константна брзина, со брзина на светлината, која приближно изнесува $3 \cdot 10^8$ m/s. Основната релација која ја поврзува брзината на светлината (c_0) со фреквенцијата (f) и брановата должина (λ) е:

$$c_0 = \lambda \cdot f \quad (10)$$

Оваа релација покажува дека фреквенцијата и брановата должина се обратно пропорционални, бидејќи со зголемување на фреквенцијата, брановата должина се намалува, и обратно.

Фреквенцијата претставува еден од фундаменталните параметри што го дефинира електромагнетниот бран и се однесува на бројот на осцилации што брановото електрично поле ги извршува во една секунда. Таа се изразува во херци (Hz), каде 1 Hz означува една осцилација во секунда. Во контекст на радарските системи, вклучително и SAR, фреквенциите најчесто се движат во опсег од стотици мегахерци (MHz) до неколку гигахерци (GHz). [52] [119]



Слика 14 Приказ на два електромагнетни бранови со различни фреквенции и бранови должини

Во пракса, радарските системи не користат единечна фреквенција, туку работат во рамките на **фреквенциски опсези (frequency bands)**. Овие опсези имаат одреден фреквенциски варијабилитет и се дефинирани преку нивната централна фреквенција. Ширината на фреквенцискиот опсег директно влијае на просторната резолуција во *range* насока. Имено, колку е поширок фреквенцискиот опсег, толку е поголема способноста на системот да разликува блиски објекти по должината на правецот на аквизиција. Именувањето на фреквенциските бендови (P, L, S, C, X, итн.) има историско потекло од времето на Втората светска војна, кога заради безбедносни причини биле воведени ознаки без очигледна логика. Целта била да се отежне препознавањето и дешифрирањето на вистинската фреквенциска распределба од страна на противникот. Иако денес овие фреквенциски опсези имаат строго технички дефинирани граници и функции, нивната првобитна номенклатура останала како наследство и сè уште е во широка употреба во научната и инженерската заедница. [42] [18]

Во SAR технологијата, овие фреквенциски опсези играат клучна улога, бидејќи различните опсези овозможуваат различен степен на просторна резолуција, пенетрација (продирање низ различни материјали) и кохерентност.

Најчесто користените фреквенциски опсези се:

- **X - band** ($f=8-12\text{ GHz}$, $\lambda \approx 3\text{ cm}$), обезбедува висока просторна резолуција и е погоден за урбани и инфраструктурни анализи.
- **C - band** ($f=4-8\text{ GHz}$, $\lambda \approx 5.6\text{ cm}$), нуди добра рамнотежа помеѓу резолуција и пенетрација низ вегетираните површини, па е широко користен во повеќе мисии, вклучително и *Sentinel-1*.
- **L - band** ($f=1-2\text{ GHz}$, $\lambda \approx 23\text{ cm}$), овозможува поголема пенетрација низ вегетација и е погоден за стабилна интерферометриска анализа на поголеми вегетирани површини.
- **P - band** ($f<1\text{ GHz}$, $\lambda > 30\text{ cm}$), обезбедува најдлабока пенетрација, но ретко се користи во цивилни апликации поради ограничувања и зголемена подложност на интерференции.

Покрај класичната фреквенција (f), која се однесува на бројот на осцилации во една секунда, во дефинирањето на електромагнетните бранови често се користи и *аголната фреквенција*, која се означува со грчката буква (ω). *Аголната фреквенција* претставува стапка на промена на фазниот агол во единица време и се изразува во радијани во секунда (rad/s). [61] Поврзана е со класичната фреквенција (f) преку следната релацијата (11):

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (11)$$

Агловната фреквенција е особено значајна во математичкиот опис на синусоидалните бранови, бидејќи фазата на брановото движење најчесто се изразува како функција од времето. Во овој контекст, аголната фреквенција овозможува аналитичко следење на брановата осцилација преку фазата, што е битен елемент за SAR интерферометријата. Во интерферометриски анализи, фазната разлика меѓу два сигнали, која се користи за мерење на поместувања или топографија на теренот, директно зависи од аголната фреквенција на електромагнетниот бран и затоа таа има битно значење за овој тип на апликации. [52] [99]

Брановата должина претставува растојание помеѓу две последователни еквивалентни точки на електромагнетниот бран, обично помеѓу два максимуми на електричното поле. Во рамките на SAR технологијата, брановата должина има важна улога, бидејќи директно влијае на интеракцијата помеѓу електромагнетниот бран и површината на Земјата. Колку е пократка брановата должина (односно колку е поголема фреквенцијата), толку е поголема просторната резолуција, што овозможува подобро детектирање на мали детали на целната површина. Меѓутоа, пократките бранови се истовремено и позасегнати од вегетација и атмосферски влијанија, што може да влијае врз фазната стабилност и кохерентност. Од друга страна, подолгите бранови должини имаат поголема пенетрација низ вегетација, снег или сува почва, што ги прави погодни за интерферометриски анализи на природни терени и стабилни рефлектирачки површини, но имаат помала резолуција. [119]

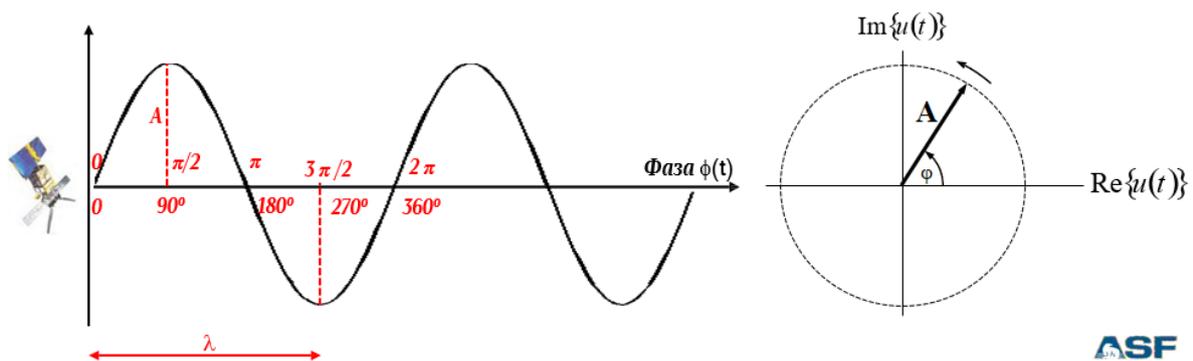
Имајќи предвид дека брановата должина е директно поврзана со фреквенцијата преку релацијата (10), во научната и инженерската литература, централната фреквенција на фреквенциските опсези многу често се изразува преку нејзината бранова должина, со цел да се добие поинтуитивна претстава за способноста на сигналот да „препознава“ структури од одредени димензии или да пенетрира во различни површински слоеви.

2.3.2 Амплитуда и фаза на електромагнетните бранови

Во контекст на електромагнетното зрачење, амплитудата и фазата се два основни параметри што ја опишуваат синусоидната природа на електромагнетните бранови.

Амплитудата (A) се однесуваат на енергијата на повратниот сигнал. Сигналот се емитура од сензорот со одредено ниво на енергија, која се менува по контактот со Земјината површина. Промената на нивото на енергија примарно зависи од рефлексијните и геометриските карактеристики на површината. Цврстите материјали, како камен или метал, обично имаат високо ниво на рефлексија, што резултира со релативно висока амплитудна вредност. Од друга страна, вегетираните површини имаат ниска рефлексија, што доведува до пониски амплитудни вредности на повратните сигнали од овие површини. Во SAR снимките, светлите пиксели укажуваат на површини со поголема амплитудна вредност, додека темните пиксели се поврзани со површини со мала рефлективност.

Фазата претставува суштински параметар во SAR интерферометријата, бидејќи е сензитивна на растојанието од сензорот до одредена точка на Земјината површина, во рамките на една бранова должина. Имено, вкупното растојание од сензорот до целната точка може да се изрази како цел број на бранови должини (λ) плус еден дел од брановата должина. Фазата го претставува токму тој преостанат дел и нејзината вредност е ограничена во опсег од 0 до 2π радијани. Бидејќи SAR системите не ја регистрираат апсолутната бројка на целосни циклуси, туку само фазната вредност, информацијата за апсолутната оддалеченост од една снимка сама по себе е неодредена. Затоа, фазната компонента добиена од една SAR снимка нема директна физичка смисла доколку не се спореди со фазата од друга снимка. SAR интерферометрија е техника која се занимава со анализа на фазната разлика помеѓу две или повеќе снимки и на тој начин може да се добијат информации за промени во растојанието, кои пак можат да се поврзат со поместувања на Земјината површина, топографија или други ефекти. [88] [53] [19]



Слика 15 Приказ на амплитудните и фазните вредности на сигналите во ротирачко ѝркало [81]

На левата страна од Слика 15 е прикажан синусоиден бран, кој го претставува осцилирањето на електричното поле во функција на времето. Висината на бранот ја покажува амплитудата (A), односно интензитетот на сигналот, а хоризонталната оска ги означува фазните вредности, изразени и во агливни радијани ($\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π) и во степени (90° , 180° , 270° , 360°). Еден цел циклус (од 0 до 2π) одговара на една бранова должина (λ), што е основна мерка за повторливоста на брановата форма.

Во повеќе наврати досега беше истакнато дека SAR снимката во секој пиксел содржи комплексни броеви, кои се резултат на кохерентната природа на системот. Причината за користење на комплексни вредности лежи во потребата да се опфатат и амплитудата и фазата на одразениот електромагнетен бран во целост. Со други зборови, едноставна реална вредност не би била доволна за да се пренесе целата физичка информација што ја носи сигналот. Па во таа насока на десната страна од Слика 15 е прикажана токму оваа комплексна репрезентација, во облик на комплексна рамнина, каде што сигналот се претставува како вектор. Хоризонталната оска (означена како Re) го претставува реалниот дел на сигналот $u(t)$, додека вертикалната оска (Im) го прикажува имагинарниот дел. Векторот што почнува од почетокот на координатниот систем ја претставува моменталната вредност на сигналот, при што:

- Неговиот интензитет ја изразува амплитудата (A) на сигналот;
- Аголот помеѓу векторот и хоризонталната оска ја изразува фазата (φ) на сигналот.

Овој пристап овозможува подобра графичка интерпретација на амплитудата и фазата на сигналот, што е особено важно кога ќе зборуваме за расејувачкиот механизам во рамките на резолуционата ќелија и перманентните расејувачи кај напредните *InSAR* техники. [53] [34]

Комплексната вредност на сигналот $u(t)$ во функција на времето, математички може да се претстави согласно следнава релација (12):

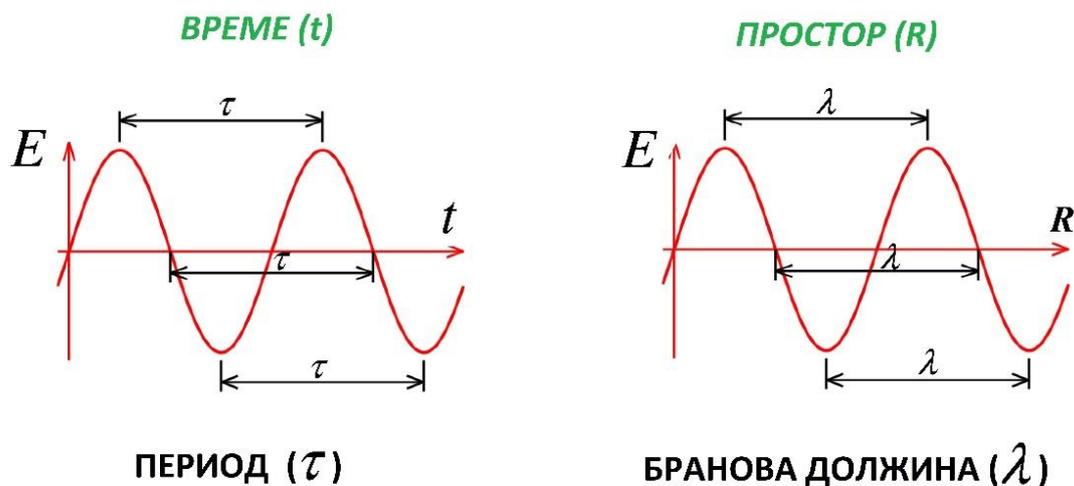
$$u(t) = A \cdot e^{j\varphi(t)} \quad (12)$$

Каде:

e – Ојлерова константа ($e \approx 2,71828\dots$);

j – Имагинарна единица.

Во релацијата (12), сигналот (u) е изразен како функција од времето (t), што ја одразува моменталната состојба на повратниот сигнал. Меѓутоа, истата релација може да се изрази и во функција од растојанието (R) во просторот, што претставува особено значајна карактеристика за интерферометриските анализи, бидејќи фазната компонента е директно зависна од геометриската оддалеченост до расејувачот. (Слика 16) [119] [88]

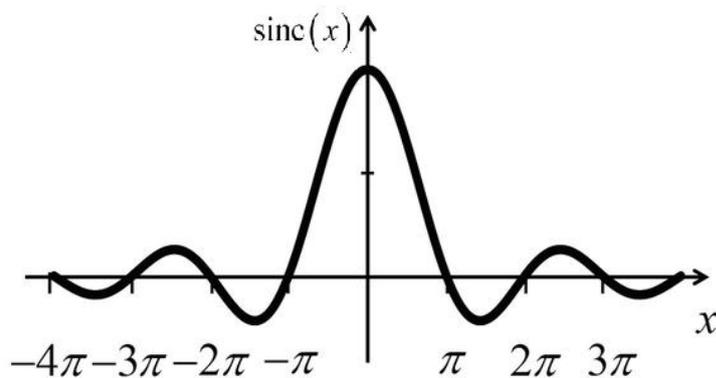


Слика 16 Приказ на електромагнетниот бран во функција на време и простор (растојание)

2.3.3 Комплексна репрезентација на електромагнетниот повратен сигнал

По дефинирањето на комплексната вредност на сигналот преку релацијата (12), каде што амплитудата и фазата се претставени преку комплексен експонент, важно е да се направи разлика помеѓу оваа *аналитичка форма* и *реалниот облик на повратниот сигнал*, кој се добива по обработката во SAR системите. Имено, во фазата на постобработка, кога се применува техниката на *пулсна компресија*, примениот сигнал се корелира со референтниот сигнал преку *филтер на совпаѓање (matched filter)*, при што се извршува вкрстена корелација меѓу двата сигнала (2.1.3 Просторна резолуција на радарските системи).

Како резултат на оваа обработка, се добива амплитудна структура на повратниот сигнал со облик на *кардинален знак*, односно *sinc-функција*, која го претставува временскиот или просторниот одзив на системот. [106]



Слика 17 Графички приказ на кардиналниот знак (sinc функција) [68]

Sinc-функцијата претставува математичка функција која се дефинирана согласно следнава релација (13):

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}; \quad \text{за } x \neq 0; \quad \text{sinc}(0) = 1 \quad (13)$$

Овој израз е нормализирана форма на sinc-функцијата и се користи во сигналната обработка, бидејќи има одлични својства за компресија и реконструкција на сигнали. Функцијата има глобален максимум во центарот ($x = 0$) и осцилаторно се намалува со растојание од центарот. [6]

Во контекст на SAR системите, оваа функција ја претставува амплитудната обвивка на повратниот сигнал добиена по пулсна компресија. Таа е резултат на вкрстената корелација меѓу примениот и референтниот сигнал и го опишува временскиот одзив на системот.

По оваа обработка, сигналот веќе не е само идеализирана математичка форма, туку реален одраз на физичките услови при интеракцијата со Земјината површина. Притоа, амплитудата на сигналот ја изразува способноста на објектот да расејува електромагнетна енергија, што зависи од неговата големина, материјал и ориентација, додека фазата го рефлектира временското доцнење на сигналот, кое е директно поврзано со растојанието до објектот.

Врз основа на гореспомнатото, конечната форма на сигналот содржи амплитудна и фазна компонента, кои заедно носат просторна и физичка информација за сцената и се изразува согласно следнава релација:

$$u(t) = A \cdot \text{sinc}[B_W \cdot (t - \Delta t)] \cdot e^{j\varphi(t)} \quad (14)$$

Каде:

B_W – Фреквенциски опсег (*bandwidth*) на емитираниот пулс;

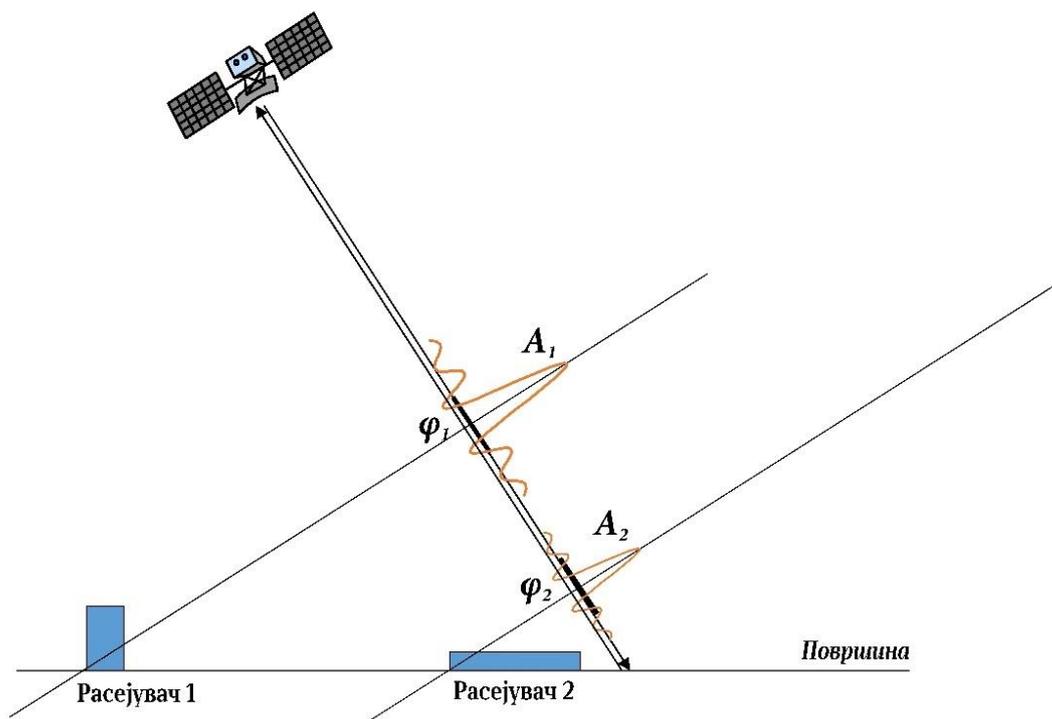
Δt – Временското доцнење на сигналот до целта.

Оваа релација покажува дека амплитудата и фазата се *независно моделирани компоненти*, што овозможува SAR системите да ја користат фазата за детекција на минимални поместувања, а амплитудата за структурна и рефлективна анализа на теренот. [3] [53]

Релацијата (14) го претставува повратниот сигнал во функција на времето, опишувајќи како се менува сигналот како резултат на временското доцнење на електромагнетниот бран од антената до целта и назад. Во SAR системите е значајно овој сигнал да се разгледа и во функција на растојанието. Со други зборови, временското доцнење Δt може да се изрази преку двонасочната патека до целта, така што ($\Delta t = 2R/c$), каде што (R) е растојанието од антената до објектот, а (c_0) е брзината на светлината. Применувајќи ја оваа релација, сигналот (u) во функција на растојанието (R) се изразува согласно следнава релација:

$$u(R) = A \cdot \text{sinc} \left[\frac{2 \cdot B_W}{c_0} \cdot (R - \Delta R) \right] \cdot e^{j\varphi(R)} \quad (15)$$

Овој израз ја опишува амплитудната обвивка на сигналот во просторот, при што *sinc*-функцијата ја дефинира распределбата на енергетскиот интензитет околу позицијата R_0 , односно околу пикселот каде е лоцирана целта. Колку што пикселот е поблиску до максимумот на *sinc*-функцијата, толку амплитудата е поголема, што значи посилен повратен сигнал. [19] [88] [3]



Слика 18 Графички приказ на повратни сигнали од два ресејувачи (модифицирано од [99])

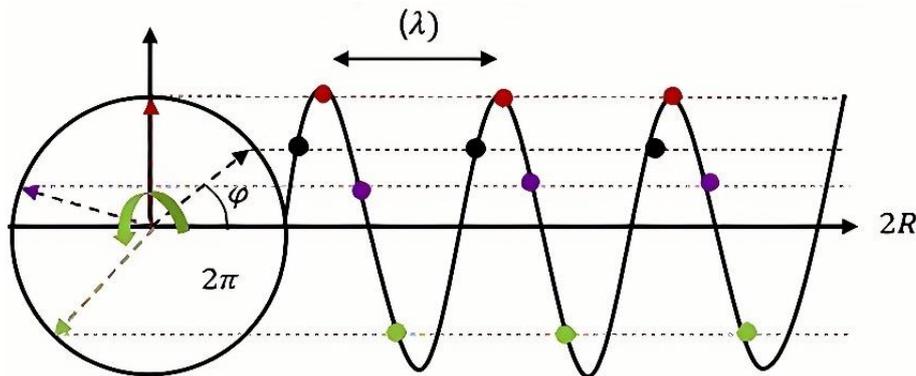
На Слика 18 графички е прикажано како испратениот сигнал се ресејува од два различни ресејувачи, означени како *ресејувач 1* и *ресејувач 2*. Обликот на нивниот одзив е дефиниран преку кардиналниот знак (*sinc* функција), кој претставува амплитудната обвивка на сигналот добиена по

пулсна компресија. Како што може да се забележи, *ресејувачот 1* има поголема амплитуда, што укажува на посилен повратен сигнал и поголема рефлективна способност, што во конкретниот случај може да се должи на неговата способност за диедрално ресејување и затоа е претставен со поголем главен лобус⁴. Од друга страна, *ресејувач 2* има помала амплитуда и затоа неговиото повратно ресејување е со понизок главен лобус.

Покрај амплитудата, двете *sinc*-функција од двата ресејувачи на сликата има и своја фазна компонента, која се однесува на оддалеченоста на сензорот до соодветниот ресејувач. Имено, фазната вредност е пропорционална на временското доцнење со кое сигналот пристигнува од ресејувачот, а тоа доцнење е поврзано со центарот (осовината) на главниот лобус. Така, *ресејувачот 1*, кој се наоѓа поблиску до антената, има помало временско доцнење и соодветно помала фазна вредност, додека *ресејувачот 2*, кој е пооддалечен, има поголемо доцнење и повисока фазна вредност. [99]

2.3.4 Интерпретација на фазната компонента

Фазната компонента на повратниот SAR сигнал е носител на прецизна просторна информација, репрезентирана преку аголот на ротација на комплексниот вектор кој го опишува електромагнетниот бран во даден момент и е директно поврзана со двојното растојанието кое брановите го поминуваат од сензорот до ресејувачот.



Слика 19 Графички приказ на фазната неопределеност (модифицирано од [35])

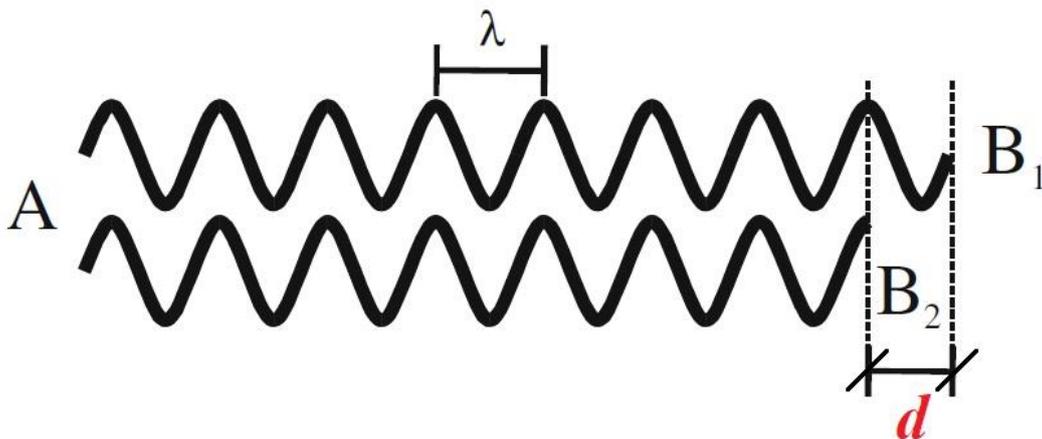
Проблемот со фазната компонента е нејзината *неопределеност*. На Слика 19 визуелно е прикажана суштинската ограниченост на радарските системи, каде фазата на сигналот се мери во *модуло* 2π , што значи дека фазната вредност е достапна само во интервали од 0 до 2π . Тоа резултира со периодичност, при што повеќе различни растојанија (односно различни вредности на $2R$) можат да дадат идентична фазна вредност. Тоа значи дека единечна SAR снимка со фазни вредности нема буквално никаква употребна вредност.

Меѓутоа, доколку се споредат два повратни сигнали што се емитирани од иста позиција, но едниот патува минимално подолго од другиот, тоа ќе предизвика мала разлика во фазата помеѓу нив. Овие фазни разлики се резултат на мали варијации во растојанието до ресејувачите. Токму во ова лежи суштината на SAR интерферометријата која е способноста да детектира и квантифицира мали фазни разлики, кои потоа се претвораат во прецизни информации за промените во релјефот

⁴ Главниот лобус го претставува централниот и најголем дел од *sinc*-функцијата (Слика 17)

или поместувањето на објектите на Земјината површина. Ова графички е илустрирано на Слика 20 каде се прикажани два сигнала со иста бранова должина, кои се емитирани од идентична позиција (A) и се детектираат на две различни позиции, (B_1) и (B_2). Разликата во патеката која ја поминуваат брановите до двете точки резултира со фазна разлика помеѓу двата примени сигнали. Оваа фазна разлика не дава информација за апсолутното растојание од изворот (бидејќи не го брои целите циклуси на бранот), туку само за преостанатиот дел од брановата должина.

Во конкретниот случајот прикажан на Слика 20, растојанието (d) помеѓу точките (B_1) и (B_2) е помало од една бранова должина, со што фазната разлика директно ја одразува разликата во патот што го поминале двата сигнали. На пример, ако фазната разлика изнесува 270° ($3\pi/2$), тоа значи дека сигналот пристигнал со доцнење што одговара на $3/4$ од бранова должина. [119]



Слика 20 Графички приказ на мерење на фазна разлика помеѓу два електромагнетни бранови [119]

Кај модерните SAR системи, фазата на повратниот сигнал може да се регистрира со многу висока сензитивност, најчесто со точност во рамките на $\pm 1^\circ$ (приближно ± 0.017 радијани). Теоретски, во идеални услови и при целосно кохерентен повратен сигнал од еден доминантен расејувач, оваа аголна точност кореспондира на ± 0.14 mm прецизност во мерењата за C-band ($\lambda \approx 5.6$ cm) и ± 0.08 mm за X-band ($\lambda \approx 3$ cm). [53]

Секако, тоа не е случај во реалноста, бидејќи фазната точност е под влијание на повеќе фактори: сложеното расејување од повеќе расејувачи во рамките на резолуционата ќелија, системскиот шум, атмосферските нарушувања, орбитните грешки, геометриските ограничувања на аквизицијата и друго. Овие појави предизвикуваат отстапувања од идеалниот случај, што ја намалува фазната стабилност и ја комплицира интерпретацијата на поместувањата. [120]

Фазната компонента од сигналот во функција на времето може математички да се моделира врз основа на следнава релација:

$$\varphi(t) = \omega \cdot \Delta t \quad (16)$$

Каде:

ω – Агловна фреквенција, дефинирана со релација (11) како $\omega = 2\pi \cdot f$;

Δt – Време кое му е потребно на сигналот да го помине патот од емитирање до регистрирање.

Во контекст на SAR системите, Δt го претставува времето потребно за сигналот да го помине двојниот пат, од сензорот до површината и назад. Со оглед на тоа што сигналот се движи со

брзината на светлината (c_0), ова време се изразува како ($\Delta t = 2R/c_0$), каде (R) е растојанието до целниот расејувачот. Од друга страна во релација (11) е дефинирана аглолната фреквенција (ω). Со замена на овие вредности во релацијата (16), фазата на сигналот во функција на времето се изразува согласно следнава релација:

$$\varphi(t) = 2\pi f \cdot \Delta t = \frac{4\pi f R}{c_0} \quad (17)$$

Релацијата (17) може дополнително да се моделира со замена на математичкиот модел за фреквенцијата (f) во функција на брзината на светлината и брановата должина (од релација (10)), со што се добива следнава релација за фазата во функција на *range* растојанието:

$$\varphi(R) = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (18)$$

На крајот, релацијата (18), може да се замени во релацијата (15) која се однесува на повратниот сигнал $u(R)$ во функција на *range* растојанието, па се добива следнава релација:

$$u(R) = A \cdot \text{sinc} \left[\frac{2 \cdot B_W}{c} \cdot (R - \Delta R) \right] \cdot e^{j \frac{4\pi}{\lambda} R} \quad (19)$$

2.3.5 Поларизација на електромагнетните бранови

Поларизацијата претставува основна физичка карактеристика на електромагнетните бранови, која ја опишува ориентацијата на осцилацијата на електричното поле во рамнината нормална на насоката на ширење на бранот. Бидејќи електромагнетните бранови се трансверзални, нивните електрични и магнетни компоненти осцилираат во насоки кои се меѓусебно поставени под прав агол. За разлика од звучните бранови, кои се лонгитудинални и немаат поларизација, кај електромагнетните бранови таа е суштински параметар што мора да се земе предвид.

Секој трансверзален електромагнетен бран може да се претстави како суперпозиција на две компоненти на електричното поле, една ориентирана хоризонтално, а другата вертикално, при што двете се под прав агол меѓусебно во насоката на ширење на брановите. [69] [119] [114]

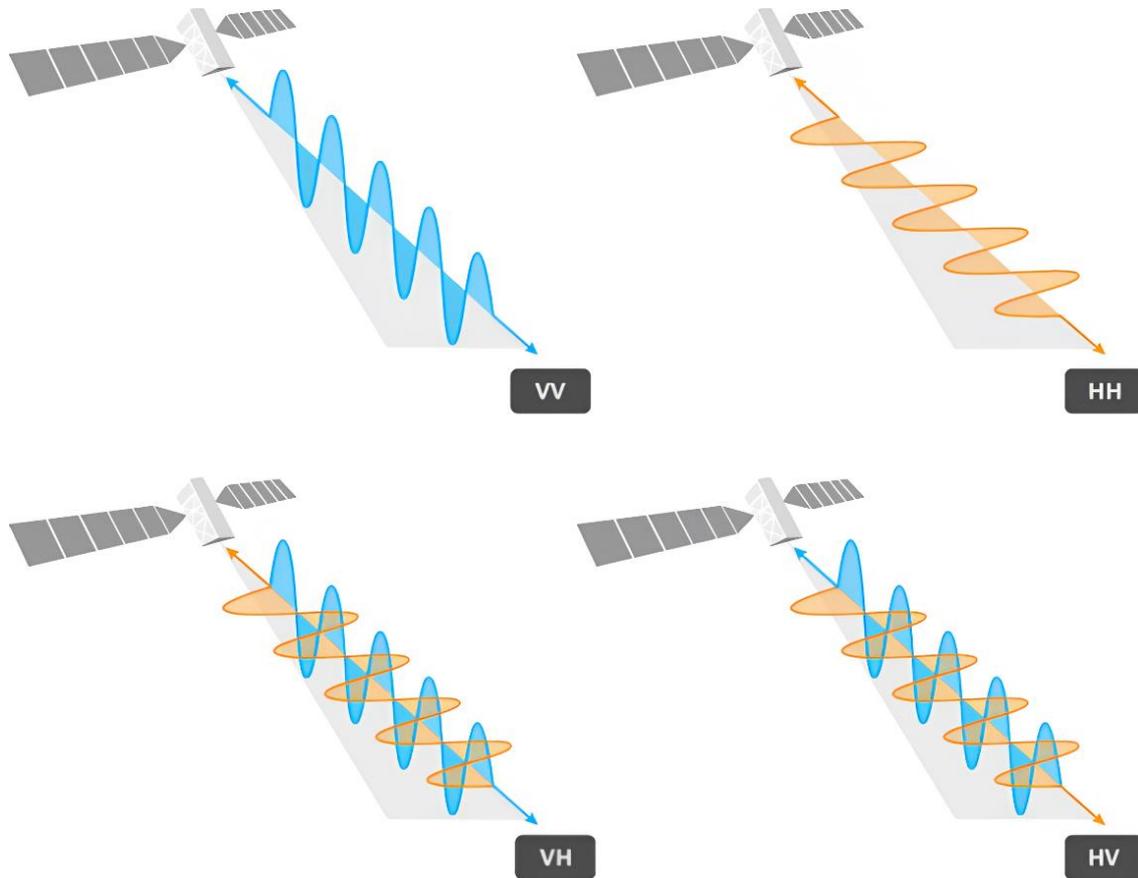
Кога осцилацијата на електричното поле се одвива исклучиво во една насока (хоризонтална или вертикална), станува збор за *линеарна поларизација*. Во SAR системите, ова е најчесто користениот вид поларизација и во зависност од насоките на трансмисија и регистрација, се разликуваат неколку типови:

- *HH* (Хоризонтална трансмисија–Хоризонтална регистрација). Сензитивна на хоризонтални структури и груби површини.
- *VV* (Вертикална трансмисија–Вертикална регистрација). Сензитивна на вертикални структури и рамни површини.
- *HV* или *VH* (*Cross-polarized*). Комбинација на хоризонтална и вертикална поларизација, сензитивна на дифузно расејување од обично од вегетирани површини [69] [80].

Современите SAR системи нудат различни режими на поларизација:

- *Single-polarization*. Само една поларизациска комбинација (најчесто *VV*).
- *Dual-polarization*. Две поларизациски компоненти (на пример *VV* и *VH*).

- *Quad-polarization (Full-pol)*. Сите четири комбинации (HH , VV , HV , VH), што овозможува сеопфатна анализа на расејување [79].



Слика 21 Комбинации на линеарна поларизација [103]

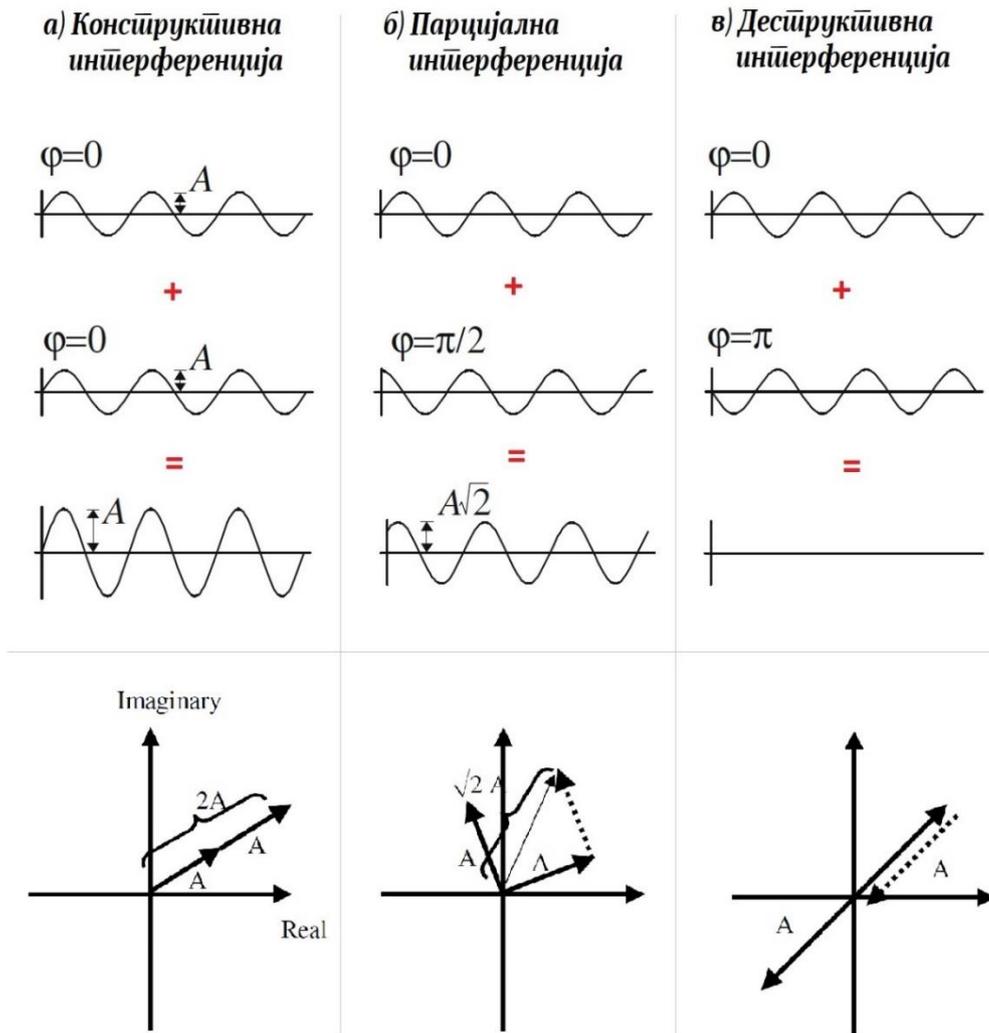
Кај интерферометриските апликации, најважна е *ко-поларизацијата*, што значи вертикална трансмисија – вертикална регистрација (VV) или хоризонтална трансмисија – хоризонтална регистрација (HH), бидејќи таа обезбедува повисока кохерентност на сигналот помеѓу две последователни аквизиции. Повисоката кохерентност овозможува попрецизна детекција на мали деформации на Земјината површина, што е од суштинско значење при анализа на тектонски поместувања, стабилност на брани, следење на урбана површина и слично. [99] [80] [69]

2.3.6 Интерференција и кохерентност на електромагнетните бранови

Комбинирањето на електромагнетните бранови е фундаментален физички процес кој се јавува секогаш кога два или повеќе електромагнетни бранови се присутни истовремено во иста точка од просторот. Овој процес не воведува до *концепцијата на суперпозиција на електромагнетните бранови*, преку *интерференција* и *кохерентност*. [119]

Интерференцијата се дефинира како *суперпозиција* на електромагнетните бранови. Во овој контекст терминот суперпозиција означува собирање на електромагнетните бранови кои имаат идентична фреквенција и амплитуда. Притоа, брановите може да бидат во различна осцилациона положба, односно да имаат различна иницијална фаза. [5] [119]

Бранова (синусиодна) интерференција



Векторска интерференција

Слика 22 Графичка интерференција на интерференцијата на брановите, во синусиоден приказ и векторски приказ (модифицирано од [119])

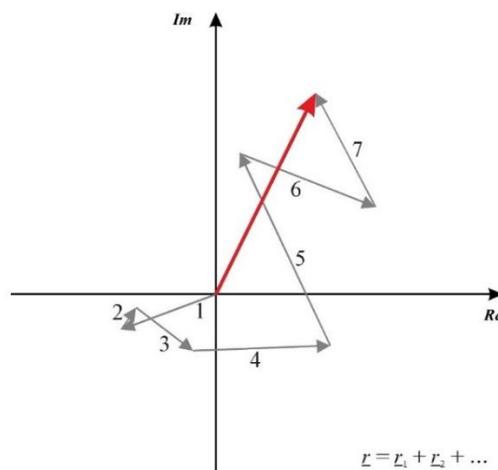
Како основен пример, ќе го разгледаме случајот на суперпозиција на два електромагнетни бранови. Интерференцијата на брановите настанува како резултат на нивната суперпозиција, при што крајната амплитуда на добиениот бран зависи од фазната разлика помеѓу комбинираниите бранови. Кога двата бранови имаат иста фреквенција, амплитуда и фаза, нивното преклопување резултира со *конструктивна интерференција*. Добиеениот бран е засилен, а неговата амплитуда е еднаква на збирот од амплитудите на поединечните бранови. Ова се случува кога фазната разлика е 0 или цел број од бранови должини (Слика 22а).

Доколку фазната разлика помеѓу двата бранови е еднаква на половина бранова должина (π радијани), се добива *деструктивна интерференција*, при што амплитудите се неутрализираат и резултатот е целосно поништување на сигналот, практично нема бран (Слика 22в).

Во реални системи, најчесто се среќаваат ситуации во кои фазната разлика е некоја произволна вредност и во таков случај се јавува *парцијална интерференција*. Амплитудата на

резултантниот бран тогаш ќе биде некаде меѓу минималната и максималната можна вредност, а фазата ќе се наоѓа меѓу фазите на оригиналните бранови (Слика 22б).

За појасна визуелизација на интерференциските ефекти, покрај класичните синусоидални профили, може да се користи **векторска интерференција**. Секој бран се претставува како вектор во комплексната рамнина, каде должината на векторот е неговата амплитудата, а насоката ја определува фазата. Со векторско собирање, се добива резултантен вектор кој го изразува комбинираниот бран. При конструктивна интерференција, векторите се во иста насока и се собираат линеарно, при што се добива подолг вектор. При деструктивна интерференција, векторите се спротивно насочени и се поништуваат. За сите останати случаи, големината и насоката на резултантниот вектор се добиваат преку геометриско собирање на векторите што ги претставуваат поединечните бранови. [54] Овој пристап е особено погоден за анализи во кои се вклучени повеќе бранови со различни амплитуди и фази, каде што конечниот интерференциски бран е векторски збир од сите бранови (Слика 23).



Слика 23 Векторска интерференција на повеќе електромагнетни бранови [119]

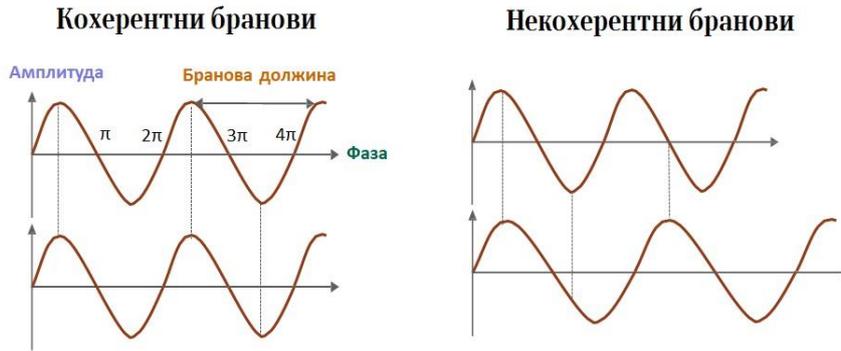
Предуслов за да се појави интерференција меѓу електромагнетни бранови е нивната кохерентност. Под **кохерентност** се подразбира способноста на два или повеќе бранови да се комбинираат на предвидлив начин. Два брана се сметаат за кохерентни ако имаат константна фазна разлика во текот на времето. Тоа значи дека тие мора да имаат и иста фреквенција и нивните осцилации се синхронизирани, така што брановите се порамнети во фаза и да делуваат како „статични“ еден во однос на друг, иако нивните вредности се менуваат со текот на времето.

Во физичка смисла, кохерентноста претставува **мерка на предвидливост**. Тоа значи колку е поголема кохерентноста меѓу два сигнала, толку е полесно да се предвиди еден сигнал ако го знаеме другиот. [77]

Од математички аспект, оваа предвидливост се квантифицира преку мерка на сличност на два бранови, оценета во однапред дефиниран интервал во време или простор. Затоа, комплексната кохерентност (Γ), помеѓу два бранови (E_1) и (E_2) се дефинира преку нивната вкрстена корелација:

$$\Gamma_{1,2} = \langle E_1 \cdot E_2^* \rangle \quad (20)$$

Во релацијата (20), заградите $\langle \dots \rangle$ означуваат **просек од повеќе реални мерења под исти услови**, познат во литературата како „ensemble average“, додека ѕвездичката (*) се однесува на вкрстената корелација помеѓу двата електромагнетни брана. [119] [120] [5]



Слика 24 Графички приказ на кохерентни и некохерентни бранови (модифицирано од [103])

Во реални услови, мерењата речиси никогаш не можат да се повторуваат на апсолутно ист начин, како што тоа го бара строгата дефиниција на *ensemble average*. Наместо тоа, се применува апроксимативен пристап, каде што просекот се пресметува врз основа на мерења кои се направени во многу блиски временски интервали или во просторна близина. Притоа се претпоставува дека секое мерење претставува нова реализација на истата целна област под слични услови. Со оваа практична претпоставка, кохерентноста може да се изрази преку нормализирана форма, пресметана како просек од повеќе N - елементи. Притоа *нормализираната кохерентност* (γ) се дефинира согласно следнава релација:

$$\gamma = \frac{\sum_N E_1 \cdot E_2^*}{\sqrt{\sum_N |E_1|^2 \cdot \sum_N |E_2|^2}} \quad (21)$$

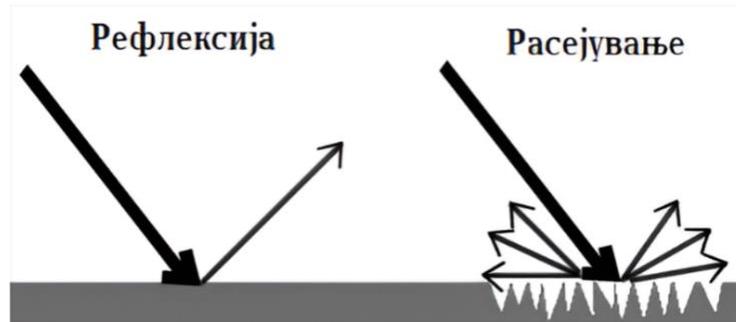
Во релацијата (21) операторот *сума* (Σ) означува сума од N -елементи (група блиски пиксели во двете снимки), врз основа на кои се пресметува кохерентноста на двата брана. Притоа именителот во оваа релација ја нормализира релацијата, така што кохерентноста (γ) може да варира од 0 до 1, односно од *целосна некохерентност*, до *апсолутна кохерентност* на двата бранови. [112] [119] [53] [35]

Во пракса, кохерентноста на електромагнетните бранови е комплексен процес и не е секогаш совршена. Иако теоретски може да се претпостави дека два бранови се целосно синхронизирани, во реалноста постојат бројни фактори кои ја нарушуваат таа усогласеност. На пример, самото емитување на брановите настанува преку микроскопски процеси во атомите или молекулите во сензорот, кои траат многу кратко, но сепак доволно за да внесат мали промени во фреквенцијата. Дополнително, доколку брановите потекнуваат од различни точки во просторот или се генерирани во различно време, тие постепено губат меѓусебна фазна усогласеност, што резултира со намалена кохерентност. [99]

2.3.7 Расејување на електромагнетните бранови

Кога еден електромагнетен бран ќе дојде во контакт со објект или површина, може да се случат неколку процеси на интеракција: апсорпција, пренос, рефракција, рефлексija и расејување. Во овој контекст, особено важна е појавата на *расејување*, што претставува процес при кој електромагнетниот бран ја менува својата насока (а често и амплитудата и поларизацијата). Иако термините „рефлексija“ и „расејување“ често се употребуваат како синоними, во физичката интерпретација тие се разликуваат по својата природа. Рефлексija се однесува на насочено одбивање на брановите од рамна и мазна површина, по дефинирани геометриски закони (агол на

инциденција = агол на одраз), додека расејувањето подразбира **ширење на енергијата во повеќе насоки**, најчесто како последица на хетерогена или груба средина, или присуство на објекти со различни димензии и облик. Во исклучителни случаи, расејувањето може да се појави во форма на рефлексија, како на пример кај идеално мазни водени површини кои се однесуваат како огледало за радарскиот сигнал. Во такви услови, поголемиот дел од енергијата се одразува во една насока, без значајно повратно расејување кон сензорот. [59] [119]



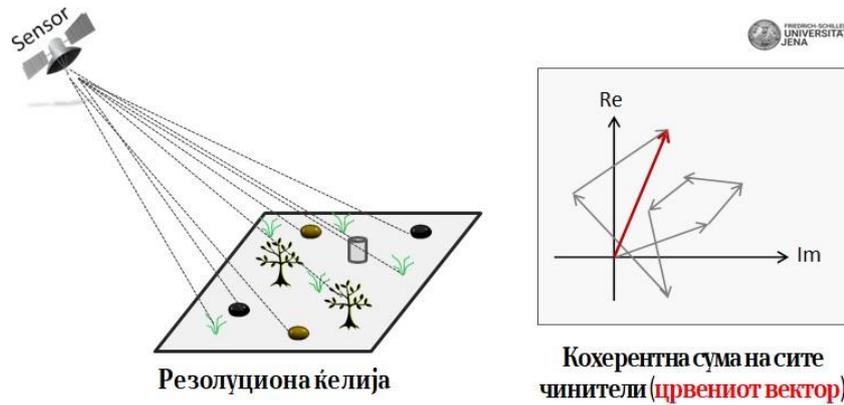
Слика 25 Приказ на рефлексија и расејување на електромагнетен бран

Во радарските системи, интензитетот на враќање на расеаниот сигнал (*backscattering*) се опишува преку параметарот *радарска појечна секција* (*Radar Cross Section - RCS*), кој ја претставува способноста на еден објект да возврати доволно енергија назад кон антената, со што станува „видлив“ за радарот. Колку е поголем *RCS*, толку поголем е регистрираниот сигнал, што овозможува подобра детекција и анализа. Неговата вредност не зависи од растојанието меѓу сензорот и целта, туку претежно од геометријата на аквизиција (аголот θ), димензиите и ориентацијата на објектот, површинската грубост, поларизацијата и брановата должина на радарскиот сигнал, како и од диелектричните својства на материјалот. Поради ваквата зависност, дури и објекти со слична физичка големина можат да имаат значително различен радарски одзив.

Иако *RCS* го опишува радарскиот одзив на индивидуален објект, во реалноста *SAR* системите не регистрираат поединечни расејувачи, туку го регистрираат **вкупното расејување од површината со димензии на резолуциона ќелија (пикселој)**. Секоја ваква ќелија, во зависност од сензорот може да покрива површина од неколку метри во двете насоки. Во рамките на таа површина, истовремено може да бидат присутни повеќе расејувачки елементи со различни димензии, облици, материјали и ориентации. На пример, кај *C-band SAR* системите (со бранова должина од ~ 5.6 cm), сензорот е особено чувствителен на објекти со споредлива големина, како гранки, листови, бетонски елементи, карпи или површинска рапавост и слично. Секој од овие елементи расејува дел од упатениот бран со специфична амплитуда и фаза, зависно од нивните физички и диелектрични својства. Во рамките на пикселот се одвива т.н. **процес на расејување**, при што доаѓа до интерференција помеѓу брановите расејани од сите присутни расејувачи (Слика 26). [64] [107] [34] [53]

Тоа би значело дека релацијата (18) со која ја моделиравме фазата во функција од растојанието (R), не ја отсликува во целост реалната ситуација, бидејќи е изоставена компонентата предизвикана од процесот на расејување (ϵ_{scatt}). Со вклучување на оваа компонента, се добива попрецизна математичка формулација на фазната вредност, согласно следнава релација:

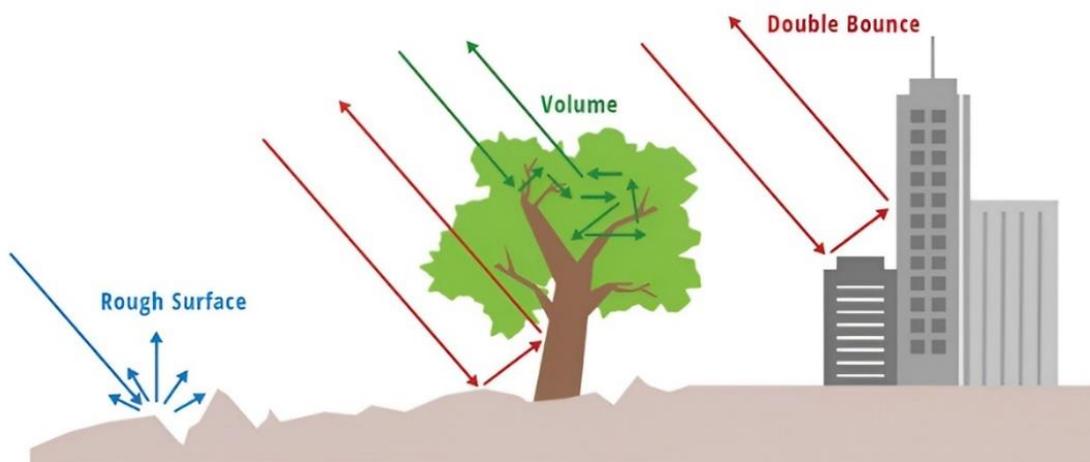
$$\varphi(R) = \frac{4\pi}{\lambda} R + \epsilon_{scatt} \quad (22)$$



Слика 26 Расејувачки процес во рамките на резолуционата ќелија (модифицирано од [103])

Во зависност од карактеристиките на површината и објектите присутни во резолуционата ќелија, расејувањето може да се класифицира според доминантниот механизам преку кој радарскиот сигнал се враќа кон сензорот. Најчестите типови на расејување опфаќаат:

- *Расејување од рава површина (Rough surface scattering)*. Се јавува кога радарскиот бран е во интеракција со површина чиј микрорелјеф е со димензии споредливи или поголеми од брановата должина. Поради рапавоста, сигналот се одразува во повеќе насоки, што резултира со намалена енергија на неговото повратно расејување кон сензорот. Овој механизам е чест кај почви и водени површини изложени на ветер.
- *Волуменско расејување (Volume scattering)*. Настанува кога радарскиот сигнал продира во внатрешната структура на медиумот, како што се вегетацијата или снежната покривка. Во внатрешноста, сигналот повеќекратно се расејува од различни внатрешни елементи, при што дел од енергијата се враќа назад кон сензорот. Овој тип расејување носи информации за внатрешните својства на објектите и нивната структура.
- *Двојно одразување (Double-bounce scattering)*. Се јавува при интеракција на сигналот со две ортогонални, мазни и високо рефлексивни површини, како на пример вертикален ѕид и земјина или водена површина. Овој механизам е карактеристичен за урбаните средини. [80]



Слика 27 Графички приказ на типовите на расејување [86]

2.3.8 Фреквенциски опсези и интерактивни својства на електромагнетните бранови

Еден од клучните аспекти при проектирањето на SAR системите е изборот на фреквентниот опсег (*frequency band*) кој ќе се користи за емисија и регистрација на сигналите. Секој фреквенциски опсег поседува сопствени карактеристики за интеракција со Земјината површина и атмосферата. Овие својства директно го определуваат квалитетот на добиените податоци и нивната соодветност за конкретната намена.

Веројатно е забележливо наизменичното користење на термините *сигнал* и *електромагнетен бран* во досегашната теоретска разработка на ова поглавје, што е разбирливо, бидејќи во многу практични случаи нивното значење е слично. Сепак, строго земено, електромагнетниот бран претставува физички феномен за пренос на енергија и информација преку осцилирачки електрични и магнетни полиња, додека сигналот, особено во радарските системи, се однесува на обработена или пренесена форма на тие бранови, со нагласок на информацијата што ја содржат.

Табела 1 Преглед на сите фреквенциски опсези кои се користат во SAR системите [79]

<i>Band</i>	Фреквенција	Бранова должина	Примена
<i>Ka</i>	27 – 40 GHz	1.1 – 0.8 cm	Ретко се користи во SAR сензорите. Обично се користи за надзор во воздушниот сообраќај
<i>K</i>	18 – 27 GHz	1.7 – 1.1 cm	Ретко се користи во SAR сензори бидејќи има својство на H ₂ O апсорпција
<i>Ku</i>	12 – 18 GHz	2.4 – 1.7 cm	Се користи само за SAR алтиметрија
<i>X</i>	8 – 12 GHz	3.8 – 2.4 cm	Висока резолуција на SAR сензорот. Се користи за мониторинг на урбани површини, <i>InSAR</i> , површини со снег и мраз, вегетациони површини и сл.
<i>C</i>	4 – 8 GHz	7.5 – 3.8 cm	Многу често користен во SAR сензорите за глобално мапирање, откривање на промени, <i>InSAR</i> , мониторирање на површини со висока кохерентност, мониторирање на океани и глечери, навигација и сл.
<i>S</i>	2 – 4 GHz	15 – 7.5 cm	Се користи за SAR опсервации, мониторирање на земјоделството и сл.
<i>L</i>	1 – 2 GHz	30 – 15 cm	Средно висока резолуција. Се користи за <i>InSAR</i> , геодинамички мониторинг, мапирање на биомаси и вегетациони површини и сл.
<i>P</i>	0.3 – 1 GHz	100 – 30 cm	Се користи за мапирање на вегетација и биомаси

Секој од фреквенциските опсези прикажани на Табела 1 има свои предности и недостатоци. K_a , K и K_u фреквенциските опсези работат на многу високи фреквенции и овозможуваат исклучително висока просторна резолуција, но нивната пенетрација низ вегетацијата и почвата е многу мала, а сигналот е значително чувствителен на атмосферски услови. Затоа овие бендови ретко се користат за сателитски платформи, па нивната најчеста примена е во авијацијата, како и за авионските и беспилотните SAR системи за детално картографирање, тактички извидувања и мониторинг на објекти со висока прецизност.

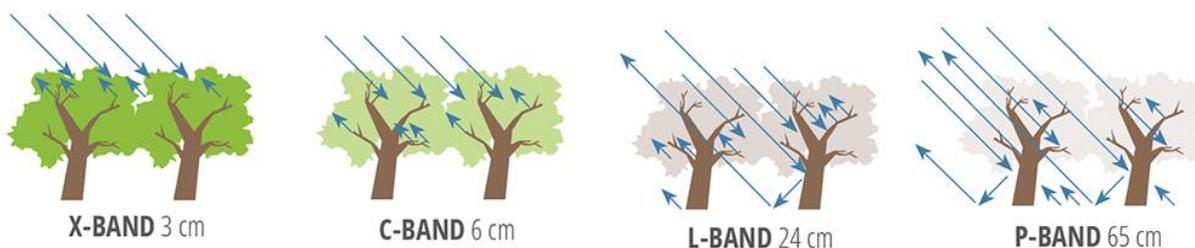
X -band сигналите обезбедуваат висока просторна резолуција и се особено погодени за урбани и инфраструктурни апликации, мониторинг на патишта, мостови, брани и други објекти со висока рефлективност. Поради кратката бранова должина, овие сигнали овозможуваат детекција на ситни детали и промени на површината, но има ограничена пенетрација низ вегетација и почва.

C -band сигналите се најупотребувани во современите SAR системи, благодарение на добриот баланс меѓу просторната резолуција и способноста за пенетрација низ вегетација. Тие овозможуваат широка покриеност и се погодни за регионален и глобален мониторинг, вклучувајќи набљудување на земјоделски површини, следење на промени во животната средина, како и мониторинг на природни непогоди. Иако обезбедуваат поголема пенетрација од X -band сигналите, сепак имаат ограничена способност да продрат низ густа вегетација или снежни површини.

S -band сигналите нудат умерена просторна резолуција и подобра пенетрација низ вегетација во споредба со C -band. Иако ретко се користат во сателитските платформи, нивната примена расте со појавата на нови мисии како *NovaSAR-S* и *NISAR*. Овие сигнали се погодни за мониторинг на шумски подрачја, земјоделски култури, следење на природни непогоди и мапирање на земјиштето. Балансот меѓу резолуцијата и пенетрацијата ги прави корисни за апликации за следење на умерена вегетација без значајно губење на просторните детали.

L -band сигналите имаат подолга бранова должина, што им овозможува значителна пенетрација низ вегетација, почва и сув снег. Ова ги прави особено корисни за шумарски истражувања, геолошки студии, како и за прецизен мониторинг на деформации на Земјината површина преку *InSAR* техниките. L -band сигналите се помалку чувствителни на атмосферски услови и промени во вегетацијата, што овозможува постабилни и покохерентни податоци.

P -band сигналите имаат најдолга бранова должина меѓу наведените опсези од Табела 1, што овозможува длабока пенетрација низ густа вегетација, сув снег и горните слоеви на почвата. Тие се особено корисни за истражувања на биомаса, структура на шумски екосистеми и геолошки формации под површината. Поради технички предизвици, овие сигнали ретко се користат на сателитски платформи. Исклучок е идната мисија *BIOMASS* на *ESA* (планирана за 2026 г.), која ќе биде првата сателитска мисија со P -band сензор за глобално мапирање на шумската биомаса.



Слика 28 Приказ на интеракција на X , C , L и P -band со вегетирана површина [79]

3. SAR ИНТЕРФЕРОМЕТРИЈА

SAR интерферометријата (*InSAR*) претставува прецизна техника базирана на анализа на фазната компонента од радарските снимки добиени од SAR сензорите. Нејзината примена овозможува прецизно и конзистентно изведување на две фундаментални геодетски задачи и тоа:

- Генерирање на глобален дигитален елевациски модел (ДЕМ) и
- Определување на милиметарски поместувања на Земјината површина.

Најимпресивниот аспект на SAR интерферометријата е нејзината способност, при оптимални услови, да детектира поместувања на Земјината површина со точност од неколку милиметри, иако просторната резолуција на снимките е од редот на неколку метри. Оваа прецизност произлегува од фактот дека фазната компонента на радарскиот сигнал е осетлива на промени во патот на електромагнетниот бран многу помала од самата бранова должина. Под услови на висока кохерентност на доминантен расејувач во рамките на резолуционата ќелија, со минимално влијание на ε_{scatt} од релација (22) и при стабилна орбитална геометрија и минимални атмосферски влијанија, фазната анализа овозможува определување на мали поместувања, дури во рамките на неколку милиметри. Со тоа, *InSAR* претставува уникатна и моќна алатка за геодетски и геофизички апликации, вклучително и долгорочен мониторинг на геодинамички процеси во регионални и глобални размери. [121] [77] [53] [35] [34]

Дополнително, за двете горенаведени апликации, просторниот опфат на анализираната област не претставува ограничувачки фактор, бидејќи методологијата може да се применува подеднакво ефикасно на локални, регионални или глобални размери, при што се задржува високото ниво на точност и рационалност во обработката на податоците.

Ова поглавје е структурирано во две целини. Првата целина се однесува на *основиите на SAR интерферометријата*, каде се разгледуваат физичките и геометриските принципи врз кои се заснова техниката, со акцент на врската помеѓу фазната разлика и промените во патот на сигналот. Изложена е математичката формализација на интерферометриската фаза, со објаснување на нејзините главни компоненти и методите за издвојување на топографската и деформациската информација, како и влијанието на ограничувачките фактори врз точноста. Понатаму, се опфатени стандардните чекори на обработка, почнувајќи од корегистрација на SAR снимките и формирање на интерферограм, преку филтрирање и отстранување на топографската компонента, до развивање (*phase unwrapping*) и интерпретација на добиените интерферометриски резултати.

Втората целина се однесува на *напредниите интерферометриски техники*, при што фокусот е насочен кон мулти-интерферометриските техники кои овозможуваат извлекување на високо-прецизни информации за поместувањата на Земјината површина преку анализа на временски серии од SAR податоците. Притоа посебен акцент е ставен во разработката на техниките кои се базирани на *PS (Point Scatterer)* и *DS (Distributed Scatterers)* *упустиааиуије*, чија комбинирана употреба овозможува зголемена просторна покриеност и веродостојност на резултатите, дури и во услови на делумна декохеренција. [36] [4] [57] [53] [63] Оваа целина претставува суштинско теоретско јадро на истражувањето во рамките на дисертацијата, чија основна цел е примена на овие напредни *InSAR* техники за прецизно следење и анализа на деформациските процеси на неколку локации на територијата на нашата држава.

3.1 ОСНОВИ НА SAR ИНТЕРФЕРОМЕТРИЈА

Терминот *интерферометрија* потекнува од два зборови од англиско потекло, *interfere* што значи мешање/преклопување и *measure* што значи мерење. Во суштина, интерферометријата се темели на појавата на *интерференција*, односно интеракција на електромагнетните бранови при нивно преклопување, при што настанува интерферометриски образец од кој може да се одрази разликата во патот на брановите, а со тоа и релативната положба на објектите во однос на изворот на зрачење. [121] [76] [53]

Интерферометријата претставува методолошки пристап кој ги користи кохерентните својства на електромагнетното зрачење за споредба на два или повеќе електромагнетни бранови, со цел да се извлечат информации за објектите или површините со кои тие бранови стапиле во интеракција. Во SAR контекст, интерферометријата се заснова на анализа на фазната разлика помеѓу две или повеќе SAR снимки од иста целна површина. Снимките може да бидат аквизирани истовремено од различни позиции, т.е со одредена *проспорна базна линија (baseline)*, како основа за добивање на ДЕМ или од идентична позиција во различни временски моменти (временски базен вектор), како основа за диференцијалниот *InSAR* за определување на поместувања на Земјината површина. Притоа во зависност од начинот на аквизиција на SAR снимките, интерферометријата може да се реализира во два основни режими и тоа:

- *Интерферометрија со еден прелет (single-pass interferometry)* и
- *Интерферометрија со повторен прелет (repeat-pass interferometry)*.

Интерферометрија со еден прелет (*single-pass interferometry*) се изведува кога двете SAR снимки се добиваат истовремено, обично со користење на две или повеќе SAR антени монтирани на иста платформа. Овој пристап овозможува елиминирање на временските варијации во сцената, обезбедувајќи висока кохерентност и поголема точност при добивање на дигитални теренски модели. За нашите истражувања поинтересен е вториот режим, интерферометрија со повторен прелет (*repeat-pass interferometry*), кој се базира на аквизиција на снимките од иста област, но во различни временски моменти, користејќи една антена која ја следи приближно истата орбитална траекторија. Овој режим е особено корисен за детекција и анализа на поместувања на Земјината површина, но е посензитивен на декохеренција предизвикана од промени во површинските својства или различните атмосферски влијанија помеѓу аквизициите. [34] [121]

3.1.1 Формирање на интерферограм

Интерферограмот се дефинира како дигитален радарски продукт што ја претставува разликата во фазите на секој пиксел помеѓу две корегистрирани SAR снимки од иста област. Од дефиницијата произлегува дека за формирање на овој дигитален продукт потребни се две *SLC (Single Look Complex)* SAR снимки со податоци за амплитудната и фазната вредност во секој нивни пиксел. Дополнително, двете SAR снимки мора да бидат меѓусебно прецизно порамнети, односно корегистрирани. *Корегистрацијата* претставува постапка со која се обезбедува секој пиксел од *референтна снимка*, да одговара на истиот просторен елемент (резулциона ќелија) во *секундарната снимка*, така што геометриското поклопување е во рамките на дел од пиксел. Ова е исклучително важно за интерферометриската обработка, бидејќи дури и мали непоклопувања можат да предизвикаат декохерентност и деградација на интерферограмот. Станува збор за технички сложен и чувствителен процес за кој постојат многу прецизни алгоритми што го

автоматизираат, но нема да навлегуваме во неговите технички детали. На базично ниво, корегистрацијата се спроведува преку приближно усогласување со користење на орбитални податоци и геометријата на снимањето, по што следи прецизно усогласување со корелациски методи и ресемплирање на секундарната снимка во координатниот систем на референтната. [51] [121] [3] [53]



Слика 29 Процес на корегистрација (порамнување) на SAR снимките (модифицирано од [81])

Согласно релација (22), фазните вредности во секој пиксел на двете снимки соодветно се изразува согласно следнава релација:

$$\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1 + \varepsilon_1$$

$$\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_2 + \varepsilon_2$$
(23)

Може да се забележи дека во релацијата (22), фазните вредности се изразуваат во функција од патот (R) и дополнителната компонента од расејувањето ($\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{scatt_{1,2}}$), но во релацијата (23) е направена мала корекција со цел попрецизно да се прикаже физичкиот процес, при што се појавува минусен предзнак пред првиот член. Овој минус произлегува од стандардната математичка репрезентација на електромагнетните бранови ($e^{j(\omega t - kR)}$), каде зголемувањето на патот (R) предизвикува *заостанување* на фазата што се изразува со минус.

Интерферограмот се добива по корегистрација на двете SAR снимки со пресметување на разликата на нивните фазни вредности, пиксел по пиксел. Притоа, доколку се претпостави дека карактеристиките на расејувањето на површината остануваат непроменети во временскиот интервал меѓу двете аквизиции, односно ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) се добива следнава релација за интерферограмската фаза ($\Delta\varphi$):

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)$$
(24)

Вообичаено, разликата во патот ($R_1 - R_2$) се движи од неколку метри до неколку стотици метри, додека брановата должина (λ) кај современите SAR системи е од редот на неколку сантиметри. Бидејќи измерената фаза е модулarno ограничена во интервалот $[0; 2\pi]$ или $[-\pi; \pi]$, се јавува **фазна неопрегеноси** (*phase ambiguity*) поради непознатиот број на целобројни циклуси ($n \cdot 2\pi$). Поради тоа, апсолутната фаза на еден пиксел сама по себе нема практична употреба без дополнителна обработка. Сепак, разликата во патот помеѓу два соседни пиксели на теренот (T_1 и T_2), кои се

оддалечени само неколку метри, вообичаено е многу помала од брановата должина. Во таков случај, фазната разлика меѓу тие пиксели може да се искористи за одредување на релативната разлика во патот ($\Delta R = R_1 - R_2$) со висока прецизност.

На *Слика 30* е прикажана базичната геометрија при SAR интерферометријата на две соседни цели, точка T_1 (референтна) и точка T_2 (мерна), аквизирани од две позиции на сателитот S_1 (референтна снимка) и S_2 (секундарна снимка). Двете точки на теренот имаат меѓусебна висинска разлика Δh . Разликата во патот помеѓу T_1 и T_2 може да се изрази како разлика помеѓу отсечките $(\overline{S_1 T_1} - \overline{S_2 T_1})$ и $(\overline{S_1 T_2} - \overline{S_2 T_2})$, соодветно. [74] [94]

Притоа под претпоставка дека не се случило никакво поместување на теренот помеѓу двете аквизиции, односно двете снимки се направени истовремено, разликата помеѓу разликите во патот за точките T_1 и T_2 (ΔR) може да се изведе согласно следниве релации:

$$\begin{aligned} \Delta R &= (\overline{S_1 T_1} - \overline{S_2 T_1}) - (\overline{S_1 T_2} - \overline{S_2 T_2}) \\ &= (\overline{S_1 B_1} - \overline{S_1 B_2}) \\ &\approx B_n (\angle \overline{B_1 S_2 B_2}) \\ &\approx B_n (\angle \overline{T_1 S_1 T_2}) \\ &\approx B_n \cdot \frac{q}{R} \end{aligned} \quad (25)$$

Каде:

B_n – Нормален базен вектор (нормално расетојание помеѓу точките на аквизиција S_1 и S_2);

$\angle \overline{B_1 S_2 B_2}$ – Аголот помеѓу отсечките $\overline{B_1 S_2}$ и $\overline{B_2 S_2}$ со теме во точката S_2 ;

$\angle \overline{T_1 S_1 T_2}$ – Аголот помеѓу отсечките $\overline{T_1 S_1}$ и $\overline{T_2 S_1}$ со теме во точката S_1 ;

q – Растојание помеѓу T_2 и T_2' . Точката T_2' е проекција на T_2 под прав агол на продолжението од правецот на *range* аквизицијата S_1 кон точка T_1 . [74] [94]

Релациите (25) експлицитно ја изведуваат зависноста помеѓу разликата во разликите во патот за точките T_1 и T_2 (ΔR) со интерферометриска нормалната базна линија (B_n) помеѓу двете аквизиции, растојанието (R) од референтната снимка кон референтната точка и растојанието (q). Доколку оваа зависност се замени во релација (24) се добива следното:

$$\Delta \varphi_{(T_1, T_2)} = - \frac{4\pi B_n \cdot q}{\lambda R} \quad (26)$$

Од *Слика 30* се забележува дека растојанието (q) може да се изрази во функција на аголот на аквизиција (θ) на референтната снимка, разликата во *range* насока (ΔR) и висинската разлика (Δh) помеѓу точките T_1 и T_2 , согласно следнава релација:

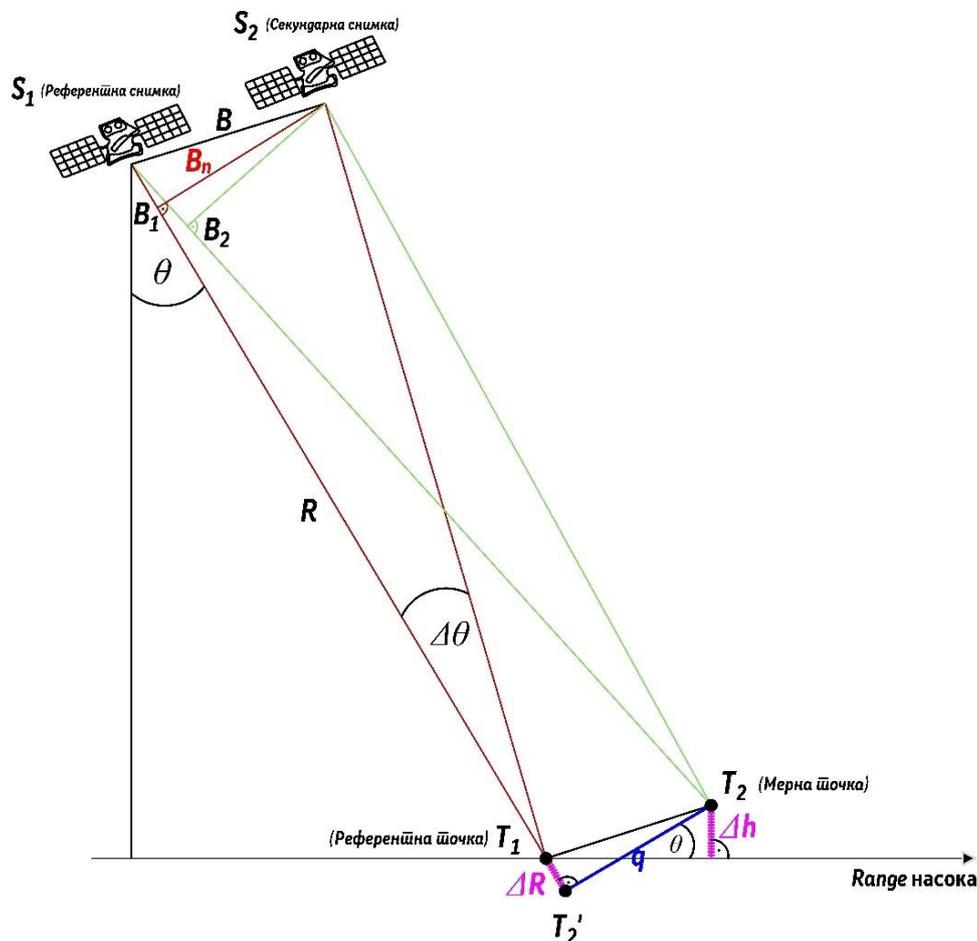
$$q = \frac{\Delta R}{\tan \theta} + \frac{\Delta h}{\sin \theta} \quad (27)$$

Па доколку релацијата (27) се замени во релацијата (26), се добива математичкиот модел за интерферометриската фаза $\Delta \varphi_{(T_1, T_2)}$ помеѓу точките T_1 и T_2 , согласно следнава релација:

$$\Delta \varphi_{(T_1, T_2)} = - \underbrace{\frac{4\pi B_n \Delta R}{\lambda R \tan \theta}}_{\Delta \varphi_{(lat)}} - \underbrace{\frac{4\pi B_n \Delta h}{\lambda R \sin \theta}}_{\Delta \varphi_{(topo)}} \quad (28)$$

Во релацијата (28), брановата должина (λ), растојанието (R), нормалниот базен вектор (B_n) и аголот на аквизиција (θ) на референтната снимка се константни параметри за конкретната аквизиција. Затоа, релацијата може да се разгледува во функција на два главни компоненти:

1. *Компонентата од геометриската разлика во range насока (ΔR)*. Оваа компонента претставува систематска фазна промена, предизвикана од различните геометриски патеки на сигналот при двете аквизиции кон истата точка. Системска фазна промена претставува предвидлив и чисто геометриски фазен тренд, познат како ефект од “рамен џерен” (*flat-terrain effect*), а неговото отстранување се нарекува *израмнување на инџерферограмот* (*interferogram flattening*).
2. *Топографска компонентата (Δh)*. Оваа компонента е директно поврзана со висинската разлика меѓу точките и е основата за извлекување на дигитален модел на теренот од интерферометриски податоци.

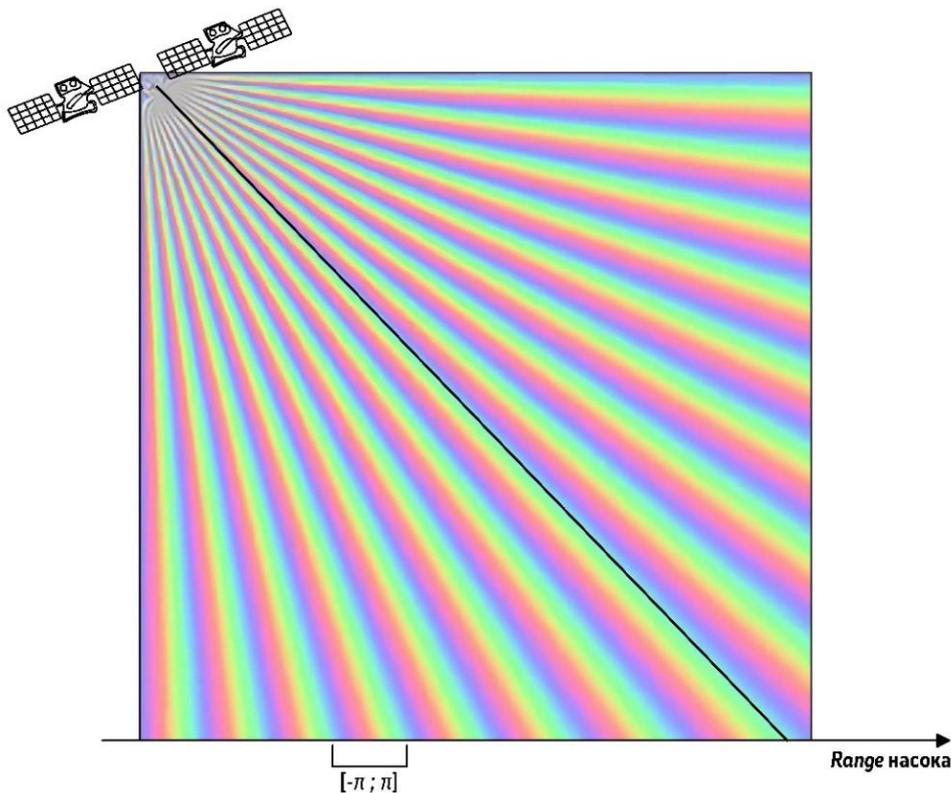


Слика 30 InSAR концепт меѓу две точки T_1 и T_2 , аквизирани од две снимки S_1 и S_2 (модифицирано од [74])

Важно е да се потенцира дека релацијата (28) важи под претпоставка дека двете аквизиции се извршени во ист момент, што е карактеристично за инџерферометрија со еден прелет (*single-pass interferometry*). Во ваков случај се елиминираат ефектите од временски промени на површината (како вегетација, атмосферски варијации или деформации), па преостанатата интерферометриска фаза зависи единствено од геометријата на снимањето и топографијата.

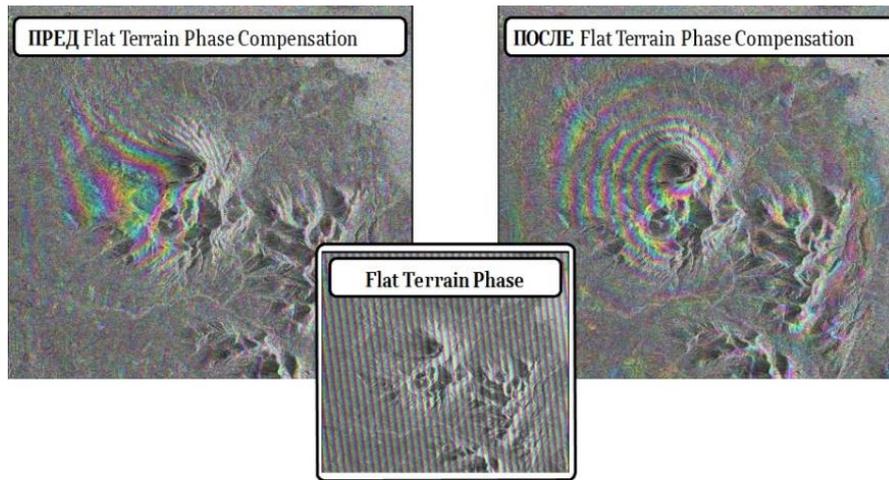
3.1.2 Израмнување на интерферограмот (*interferogram flattening*)

Првиот собирок од релацијата (28) се однесува на *flat-terrain* компонентата од интерферометриската фаза ($\Delta\phi_{flat}$) и истата зависи од *range* растојанието на точка T_2 проектирана во правецот $\overline{S_1 T_1}$. Тоа предизвикува константа *фазна рампа* (*phase ramp*) во интерферограмот во *range* насока, со стапка пропорционална на нормалниот базен вектор (B_n) (Слика 31). Бидејќи нормалниот базен вектор може да се определи со висока точност од прецизните орбитални податоци за двете аквизиции, оваа фазна компонента може експлицитно да се пресмета и да се отстрани од интерферометриската фаза. Постапката се нарекува *израмнување на интерферограмот* (*interferogram flattening*) и резултира со фазна карта која е пропорционална на релативните висински разлики на теренот. [121] [49] [53]



Слика 31 Геометриска интерференција на ефектот на рамниот терен (*flat-terrain*) предизвикан од модуло 2π

Фазната вредност на *flat-terrain* компонентата во интерферометриската фаза ($\Delta\phi$) не содржи корисна информација за ниту една апликација и поради тоа вообичаено се отстранува. Сепак, доколку орбиталните податоци не се достапни, фазната рампа предизвикана од оваа компонента може да се искористи за проценка на нормалната интерферометриска базна линија. Тоа може да се постигне со примена на Фуриева трансформација во дводимензионалниот простор *range/azimuth*. Но доколку се достапни прецизни орбитални податоци (како што е случај со новите SAR системи), фазниот член од компонентата за рамниот терен може да се процени со симулација на интерферометриската фаза генерирана од површина во копнени координати со константна елипсоидална височина и да се елиминира (Слика 32).



Слика 32 Приказ на интерферограмоти пред и после корекцијата за flat-terrain (модифицирано од [80])

3.1.3 Топографска компонента во интерферометриската фаза

Вториот собирок од релацијата (28) се однесува на топографската компонента ($\Delta\varphi_{topo}$) од интерферометриската фаза, која е пропорционална на висинската разлика на точката T_2 во однос на референтната точката T_1 . Присуството на оваа компонента ја покажува сензитивноста на интерферометриската фаза на топографските варијации на теренот во набљудуваната област, што е и причината зошто изработката на ДЕМ претставувала првата практична апликација на SAR интерферометријата. Ако претпоставиме дека аквизицијата на снимките од кои е генериран интерферограмот на Слика 32 е врз база на *single-pass* интерферометрија, тогаш интерферограмот после проекцијата за *flat-terrain* компонентата содржи само топографски информации.

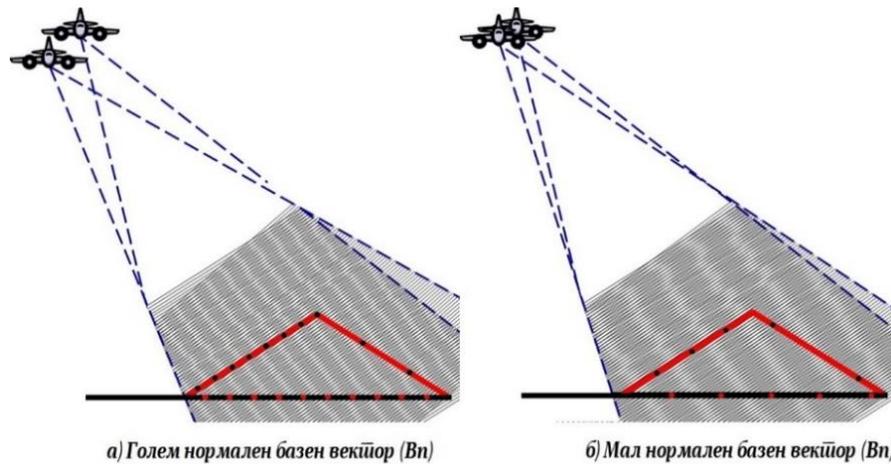
Фундаментален параметар за квантитативна оценка на сензитивноста на интерферометриската фаза кон топографската компонента е **висинската неопределеност Δh_{amb} (height ambiguity)**. [53] Овој параметар ја покажува висинската разлика што предизвикува фазна ротација еднаква на 2π и се изразува согласно следнава релација:

$$\Delta h_{amb} = \frac{\lambda R \sin \theta}{2 B_n} \quad (29)$$

Од изразот јасно се забележува дека модификацијата на топографската компонента генерално зависи од користената бранова должина на сигналот (λ) и нормалниот базен вектор (B_n) (висината и аголот на аквизиција се однапред дефинирани). Нормалниот базен вектор е важен параметар со кој најлесно се модифицира сензитивноста на интерферометрскиот систем на топографските варијации на теренот. Согласно релацијата (29) неговата вредност е обратно пропорционална од висинската неопределеност, што значи поголемиот базен вектор резултира со помала висинска неопределеност и обратно.

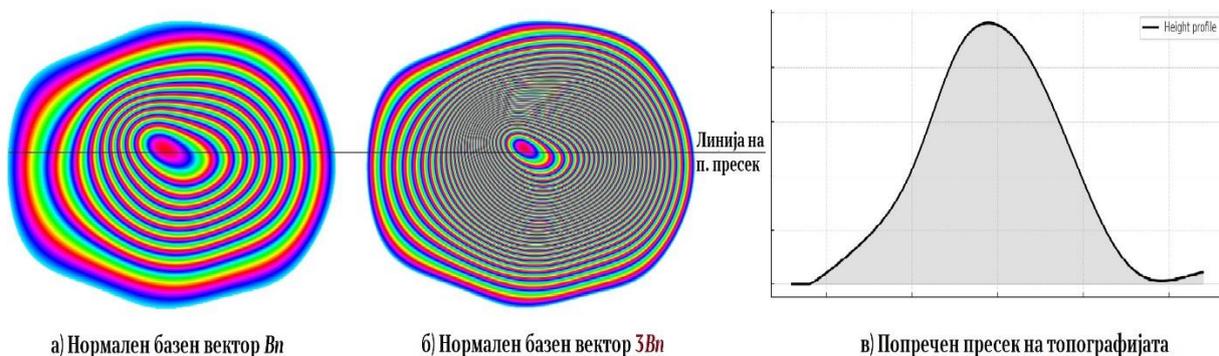
Сепак, зголемувањето на нормалниот базен вектор над оптималната граница може да доведе до декохерентност, како резултат на значителната разлика во аголот на аквизиција помеѓу двете SAR снимки. За таа цел, во пракса се дефинира т.н. **критичен базен вектор**, при кој настанува целосна декохеренција. [120] Овој параметар служи како референтна граница за избор на соодветна вредност на нормалниот базен вектор, која овозможува висока топографска сензитивност, а притоа ја задржува прифатливата кохерентност.

На Слика 33 е прикажана графичка интерпретација на улогата на нормалниот базен вектор врз сензитивноста кон топографската компонента, што резултира со различна густина на т.н. **колоритни низи (fringes)**. [51] [121] Колоритна низа во интерферограмот претставува повторлив образец од обоени појаси што настанува поради периодичната природа на интерферометриската фаза. Кога интерферометриската фаза е сочинета само од топографската компонента, секој целосен циклус на боите (од 0 до 2π) одговара на фиксна промена на мерената висинска разлика, а една колоритна низа е еквивалентна на висинската неопределеност (Δh_{amb}). На тој начин, густината на колоритните низи е последица од големината на нормалниот базен вектор, што би значело, поголем базен вектор генерира погусте низи и повисока топографска сензитивност, но и зголемена подложност на декохерентност и геометриски изобличувања.



Слика 33 Улога на нормалниот базен вектор врз сензитивноста кон топографската компонента [24]

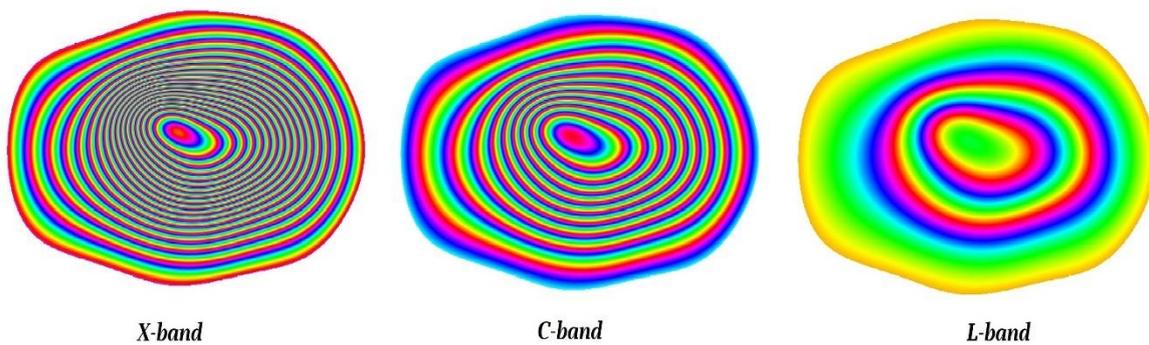
На Слика 34 е прикажана симулација на топографската компонента на интерферометриската фаза за идеализиран планински релјеф, со цел да се илустрира влијанието на големината на нормалниот базен вектор врз густината на колоритните низи. При помал базен вектор, растојанието меѓу колоритните низи е поголемо, што значи дека фазната промена е поспора и топографската сензитивност е помала. Со зголемување на базниот вектор, колоритните низи стануваат погусте, бидејќи и мала промена во висината предизвикува значителна фазна промена, со што се зголемува деталноста на топографската информација. Попречниот пресек на релјефот ја прикажува основната висинска конфигурација врз која се базира симулацијата.



Слика 34 Симулација на топографската компонента од планинска конфигурација а) со помал нормален базен вектор B_n б) со три пати поголем базен вектор во однос на првиот случај в) попречен пресек на топографијата на теренот

Втората компонента од релацијата (29) од која зависи висинската неодреденост е брановата должина на радарскиот сигнал. Таа е право пропорционална на висинската неодреденост, што значи дека поголемата бранова должина резултира со поголема висинска неодреденост и обратно.

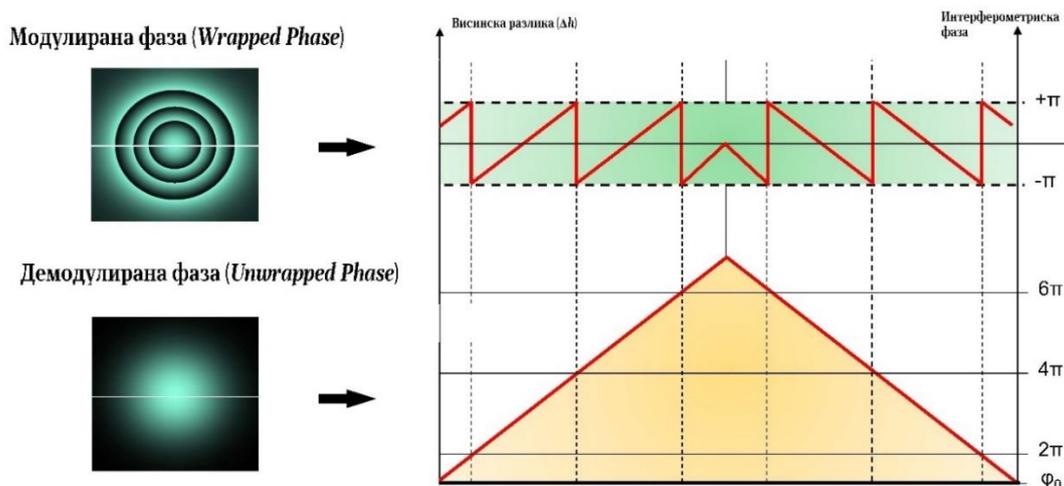
Сепак, изборот на сигнал со конкретна бранова должина не е диктиран единствено од барањата за топографската сензитивност, туку и од карактеристиките на неговата интеракција со Земјината површина. Кратките бранови должини (*X-band*) обезбедуваат висока сензитивност и фина просторна деталност, но повеќе се подложни на декохерентност во површините со висока диелектрична константа, како што се вегетираните подрачја или регионите со заситени почви. Средните бранови должини (*C-band*) претставуваат компромис помеѓу сензитивноста и стабилноста на сигналот, што ги прави погодни за оваа апликација, додека долгите бранови должини (*L-band*) имаат помала топографска сензитивност, но продираат подлабоко низ вегетацијата и задржуваат кохерентност во комплексни терени (Слика 35).



Слика 35 Симулација на идеализирана топографска компонента од планинска конфигурација со сигнали со различни бранови должини а) *X-band* б) *C-band* в) *L-band*

3.1.4 Фазно развивање (*phase unwrapping*)

Фазното развивање (*phase unwrapping*) е процес со кој се конвертира модулираната фаза (*wrapped phase*) чија вредност е ограничена во интервалот од 0 до 2π во демодулирана (*unwrapped phase*) или апсолутна фаза што претставува вистинска, линеарна промена на висинската разлика.



Слика 36 Графички приказ од модулирана и демодулирана фаза од топографска компонента (модифицирано од [24])

Колоритните појаси во интерферограмот се резултат на фазното модулирање од 0 до 2π и прикажуваат само релативни промени на теренот. Целта на развивањето на фазата е од релацијата (30) да се одреди целиот број циклуси (k) што треба да се додаде на модулираната фаза (φ), така што за секој пиксел од интерферограмот ќе се добие недвосмислената вредност на фазата (Слика 36). [49] [34] [46]

$$\varphi_{[Unw]} = \varphi_{[0;2\pi]} + 2\pi \cdot k = k \cdot \Delta h_{amb} \quad (30)$$

Каде:

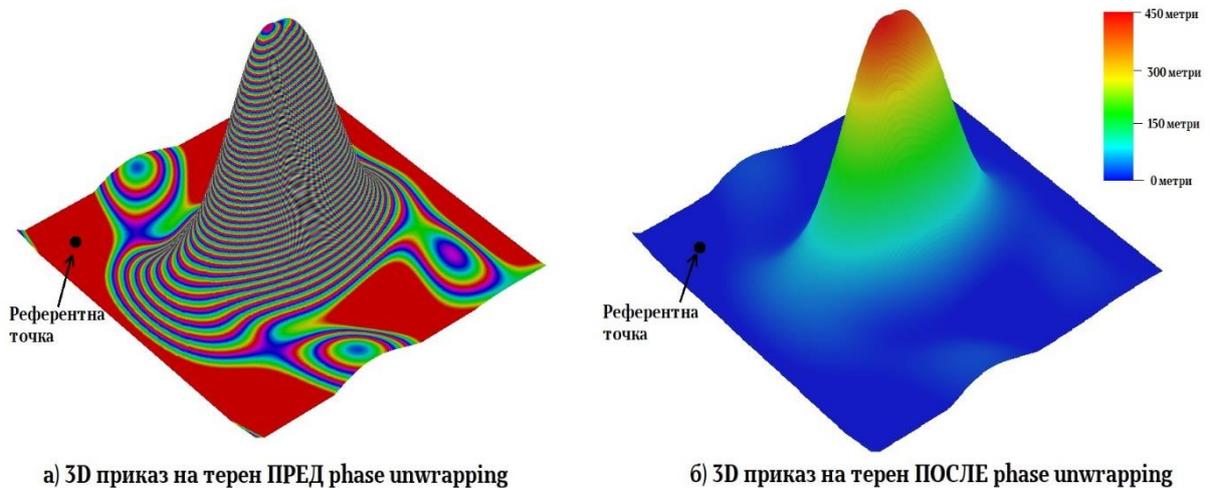
$\varphi_{[Unw]}$ – Развиена (демодулирана) фаза;

$\varphi_{[0;2\pi]}$ – Модулирана интерферометриска фаза, превземена од интерферограмот;

k – Број на целосни бранови циклуси 2π , графички прикажани како колоритни низи;

Δh_{amb} – Висинска неодреденост.

Процесот се темели на одредување на референтна точка од која постепено се развива фазата по целиот интерферограм. На Слика 37 е прикажана симулација на фазно развивање на идеализирана интерферометриска фаза која содржи само топографска компонента. Процесот на демодулација е мултиплицирање на бројот на колоритни низи со висинската неодреденост. На тој начин, модулираната топографска фаза директно се конвертира во ДЕМ со релативни висински разлики во однос на референтната точка.



Слика 37 Симулација на фазно демодулирање на идеализирана интерферометриска фаза

Во реални услови, процесот на фазното развивање е значително отежнато од присуството на шум, декохерентност или нагли промени во сигналот, односно остри скокови на фазата меѓу соседни пиксели поголеми од половина циклус (π радијани). Поради тоа, се применуваат комплексни алгоритми за глобална оптимизација, кои ги комбинираат фазните информации со дополнителни индикатори, со цел да се минимизира влијанието на шумот и да се обезбеди стабилно демодулирање низ целиот интерферограм. Без да навлегуваме во теоретските основи, само ќе споменеме некои од најпознатите алгоритми за фазно демодулирање: *Goldstein Branch-Cut Algorithm* [49], *SNAPHU* (Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping) [11], *Minimum Cost Flow (MCF)* [15], *Quality-Guided Algorithm* [40], *Least-Squares Algorithm* [47] и други.

3.1.5 InSAR како фундаментална технологија за глобалните ДЕМ модели

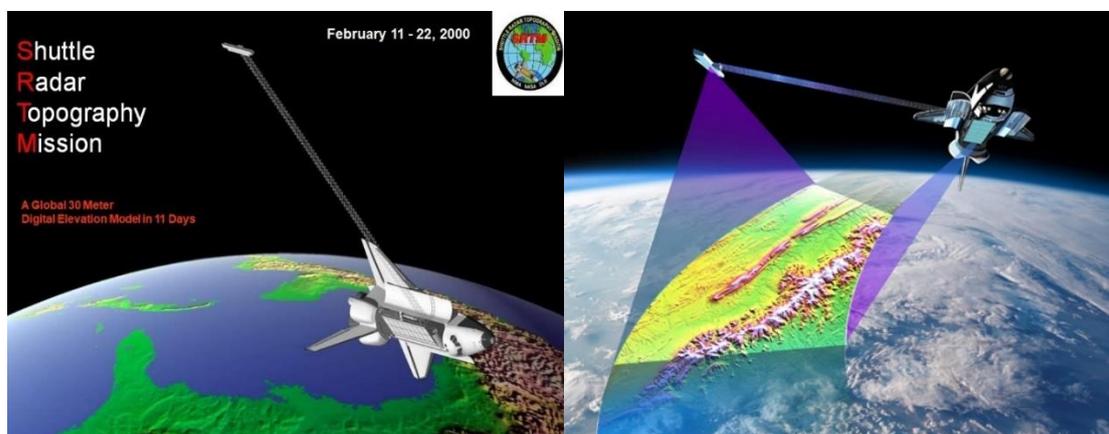
Еден од најзначајните придонеси на SAR интерферометријата е можноста за прецизно генерирање на глобални дигитални елевациски модели со голема просторна резолуција и хомогена точност, дури и во области каде традиционалните методи (фотограметрија, класична геодезија) се тешко применливи поради непристапен терен или неповолни временски услови.

За разлика од оптичките методи на далечинската детекција, InSAR не зависи од дневната светлина и е во голема мера независен од облачноста, што овозможува систематско и глобално покривање. Принципот на *single-pass интерферометрија* (каде двете SAR антени снимаат исто подрачје во исто време, од различни позиции) овозможува елиминирање на ефектите од атмосферските варијации и добивање чиста топографска компонента на фазата.

Токму овој пристап на *single-pass интерферометрија*, беше основа на **SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)** мисијата која за првпат овозможи речиси глобален ДЕМ со просторна резолуција од 30 метри. Мисијата беше спроведена како заеднички проект на NASA, NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) и DLR (Германскиот аерокосмички центар), во соработка со ASI (Италијанската вселенска агенција).

SRTM DEM моделот е добиен од 11-дневната мисија во периодот од 11^{ти} до 22^{ви} февруари 2000 година, користејќи SAR сензори со C-band сигнали. Овој модел обезбедува покриеност помеѓу 60° северна и 56° јужна географска ширина со просторна резолуција од 30 метри. SRTM DEM има вертикална точност од околу ±10 метри и е широко користен за топографско мапирање, моделирање на водни текови и други геопросторни апликации. [33]

Успехот на SRTM мисијата ја потврди ефективноста на *single-pass InSAR* техниката како водечки метод за создавање унифицирани дигитални модели на релјефот со глобална покриеност. SRTM DEM стана основна референтна површина во бројни дисциплини, почнувајќи од геодетски и инженерски проекти, планирање на инфраструктура и урбан развој, до геоморфолошки, геолошки и климатски истражувања. Благодарение на својата униформност, моделот се користи за интерполација на податочни празнини во локални топографски бази, како основа за орто-ректификација на сателитски снимки, како и за калибрација и споредба со поновите висински модели. Овој пристап покажа дека правилно конфигурираната топографска компонента на интерферометриската фаза може да обезбеди конзистентна висинска информација применлива во широк спектар на научни и инженерски активности на глобално ниво.



Слика 38 SRTM мисија [81] [105]

Во 2020 година, Европската вселенска агенција (ESA) во рамките на програмата *Copernicus* го претстави *Copernicus DEM*, новиот подобрен глобален дигитален модел создаден врз основа на *TanDEM-X* и *TerraSAR-X* мисиите, кои користат *repeat-pass InSAR* техника. Во овој концепт, двата SAR сателити летаат во многу блиска и строго контролирана орбитална формација, обично на растојание од околу 250–500 метри еден од друг. Поради оваа конфигурација, аквизициите на истата површина се раздвоени за само неколку секунди, што е доволно краток временски интервал за да се минимизираат атмосферските и орбиталните варијации. Благодарение на високата синхронизација и прецизната орбитална контрола, топографската фаза се репродуцира речиси идентично на онаа добиена со вистински *single-pass* интерферометриски систем, овозможувајќи генерирање на глобален модел со исклучително мали грешки од атмосферска или орбитална природа.

Copernicus DEM е достапен во две просторни резолуции: 30 m (*GLO-30*) и 90 m (*GLO-90*) и обезбедува вертикална точност ± 2 m за терени со наклон до 20% и ± 4 m за стрмни терени, потврдена преку калибрација и верификација со глобални геодетски референтни податоци (*ICESat* и *GNSS* станици). Моделот обезбедува речиси целосна глобална покриеност, од 84° северна до 90° јужна географска ширина, што го прави унифицирана и конзистентна топографска основа за широк спектар на апликации, од геодинамички истражувања и климатски модели, до управување со природни ресурси и планирање на големи инфраструктурни проекти. [43] [31]



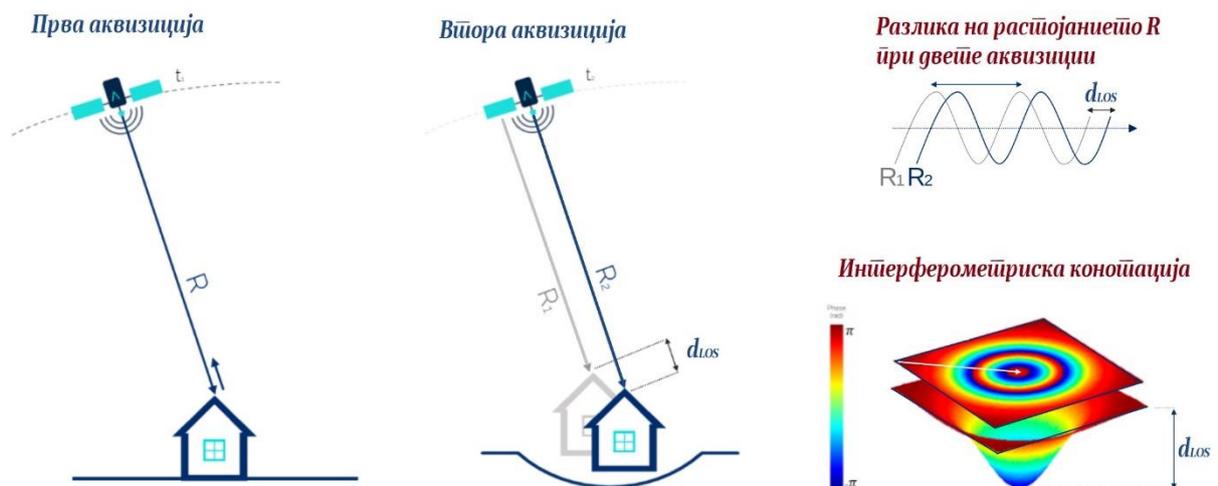
Слика 39 *Copernicus DEM* мисија [23]

Во рамките на оваа докторска дисертација, при сите спроведени деформациски анализи е користен *Copernicus DEM (GLO-30)* моделот, кој обезбедува најпрецизни и актуелни елевациски податоци на глобално ниво. Неговата висока просторна и вертикална точност овозможува стабилна и конзистентна репрезентација на релјефот, со што се минимизираат резидуалните топографски грешки кои би можеле да се манифестираат како привидни деформации. Прецизното моделирање и елиминирање на топографската компонента претставува фундаментален предуслов за издвојување на вистинската деформациска компонента од интерферометриската фаза. Ова е процес кој е подетално разработен во наредното подпоглавје посветено на диференцијалната интерферометрија (*DInSAR*).

3.2 ДИФЕРЕНЦИЈАЛНА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЈА (DInSAR)

При дефинирањето на интерферометриската фаза $\Delta\varphi_{(t_1, t_2)}$ согласно релацијата (28), го поставивме предусловот двете SAR аквизиции се изведуваат истовремено, односно со *single-pass* интерферометрија. Овој пристап е карактеристичен за мисии чија примарна цел е генерирање прецизни дигитални модели на теренот, бидејќи ја отстранува временската компонента на фазата и овозможува директно моделирање на топографијата.

За разлика од *single-pass* конфигурациите, голем број современи SAR мисии работат по принцип на *repeat-pass*, при што истата површина на Земјата се аквизира повеќепати во различни орбитални премини на сателитот. Овој метод се заснова на повторното прелетување на сателитот по речиси идентична орбитална траекторија, со временски интервал строго зададен од повторливиот циклус (*revisit time*) на конкретната мисија (на пр., 12 дена за *Sentinel-1*, 11 дена за *TerraSAR-X/TanDEM-X*, 8 дена за *COSMO-SkyMed* итн.), при што набљудувањето секогаш се врши во исто локално време над анализираното подрачје. Секоја нова аквизиција овозможува покривање на просторни појаси со широчина од стотици километри, при што се создава континуитет во податочната серија и се обезбедуваат услови за градење на временски интерферометриски записи. Овој пристап е клучен не само за регистрирање на деформациските процеси, туку и за обезбедување на податоци што овозможуваат нивна квантитативна анализа, бидејќи овозможува откривање на промени што настанале помеѓу двете (или повеќе) аквизиции.



Слика 40 Графички приказ на основниот концепт на DInSAR (модифицирано од [20])

Како резултат на претходно изложеното, интерферометриската фаза, покрај геометриската и топографската компонента дефинирани во релацијата (28), може да содржи и **деформациска компонента**. Оваа компонента се јавува доколку помеѓу SAR аквизиции се случило физичко поместување на теренот (Слика 40). [35] [34] [96]

Деформациската компонента во интерферометриската фаза е директна последица од промената на растојанието во правецот на аквизиција (*Line-of-Sight*) помеѓу сензорот и набљудуваната точка на површината (Слика 40). При секое поместување на објектот или теренот во временскиот интервал меѓу аквизициите, се менува растојанието што радарскиот сигнал треба да го помине до таа точка. Оваа промена, иако често е во милиметарски или сантиметарски размери, предизвикува фазно поместување кое радарот го регистрира со висока сензитивност.

Математички, вкупното поместување во тродимензионален простор може да се проектира врз рамнината дефинирана од хоризонталната насока (паралелна на површината - d_x) и вертикалната насока (нормална на површината - d_h). Радарот, не ги мери овие компоненти поединечно, туку нивната проекција во LOS насока (d_{LOS}). [53] [77] Оваа проекција зависи од аголот на аквизиција (θ) и може да се изрази како комбинација на вертикалното и хоризонталното поместување согласно следнава релација:

$$\Delta\varphi_{(disp)} = -\frac{4\pi}{\lambda}(d_h \cos \theta + d_x \sin \theta) = -\frac{4\pi}{\lambda}d_{LOS} \quad (31)$$

Интерферометриската фаза е исклучително чувствителна на овие поместувања бидејќи **поместување од половина бранова должина предизвикува фазна промена од 2π** . Сепак, чувствителноста е ограничена исклучиво во *slant range* насоката, што значи дека поместувања во насока ортогонална на оваа линија не се регистрираат. При дадена геометрија на аквизиција, невозможно е да се реконструира целосната насока на поместувањето од една единствена аквизиција. Затоа интерферометриската вредност на поместувањето во LOS правецот претставува само проекција на вистинскиот тродимензионален вектор на поместување.

Согласно горенаведеното, релацијата (28) може да се прошири со дополнителен член која ја претставува *деформациската компонента*. Со тоа, вкупната интерферометриска фаза помеѓу две SAR аквизиции при *perat-pass* интерферометрија се моделира како збир од следниве три основни компоненти:

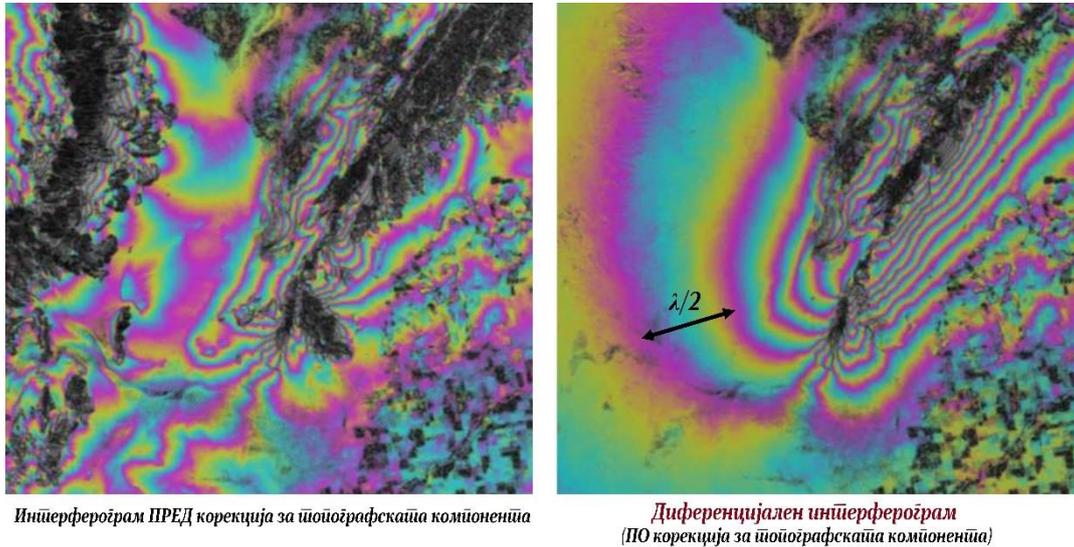
$$\Delta\varphi_{(T_1, T_2)} = \underbrace{-\frac{4\pi B_n}{\lambda} \frac{\Delta R}{R \tan \theta}}_{\Delta\varphi_{(flat)}} - \underbrace{\frac{4\pi B_n}{\lambda} \frac{\Delta h}{R \sin \theta}}_{\Delta\varphi_{(topo)}} - \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS}}_{\Delta\varphi_{(disp)}} \quad (32)$$

Во претходното подпоглавје, при разгледување на топографската компонента, беше наведено дека *flat-terrain* компонентата нема практично значење и релативно лесно може да се моделира и елиминира од интерферометриската фаза. Топографската компонента, пак, се моделира со употреба на прецизен дигитален модел на теренот и познатата орбитална геометрија на SAR сензорот за определување на нормалниот базен вектор. Врз основа на овие податоци, се генерира **синтетички интѐрферограм** кој ја претставува очекуваната топографска компонента. Овој синтетички интерферограм потоа се отстранува од оригиналниот интерферограм, со што се минимизира влијанието на топографските ефекти врз вкупната интерферометриска фаза. Добиениот интерферограм претставува **диференцијален интѐрферограм**, а постапката се нарекува **диференцијална SAR интѐрферометрија (Differential SAR Interferometry - DInSAR)**, која за прв пат е споменета во [44] и се пресметува согласно релацијата:

$$\Delta\varphi_{(T_1, T_2)}^{DInSAR} = \Delta\varphi_{(T_1, T_2)} - \Delta\varphi_{(flat)} - \Delta\varphi_{(topo)} \quad (33)$$

Важно е да се нагласи дека диференцијалниот интерферограм, иако претставува суштинска основа за добивање информации за деформациските процеси, не е секогаш лесен за директна интерпретација. Причината за тоа лежи во фактот дека во него, покрај посакуваната деформациска компонента, често се вклучени и други фактори кои можат значително да ја маскираат вистинската слика за поместувањата на теренот. Многу важно влијание има атмосферската компонента, која настанува како резултат на разлики во атмосферските услови (температура, притисок, влажност) помеѓу двете аквизиции и се манифестира преку варијации во брзината на електромагнетниот бран при неговото движење низ атмосферата. Дополнително, грешки или неажурирана теренска состојба во дигиталниот модел на теренот користен за

моделирање и отстранување на топографската компонента, исто така можат да биде причина за појавата на резидуалните топографски сигнали во диференцијалниот интерферограм. Овие грешки често се засилуваат доколку сензитивноста на интерферометриската фаза кон топографијата е ограничена, на пример, при мали базни линии помеѓу две SAR снимки од кои е генериран диференцијалниот интерферограм. На сето ова треба да се додадат и неизбежната фазна декорелација, манифестирана првенствено преку временската (темпорална) и геометриска декорелација.



Слика 41 Приказ на интерферограм пред корекција на топографската компонента и диференцијален интерферограм (модифицирано од [80] [81])

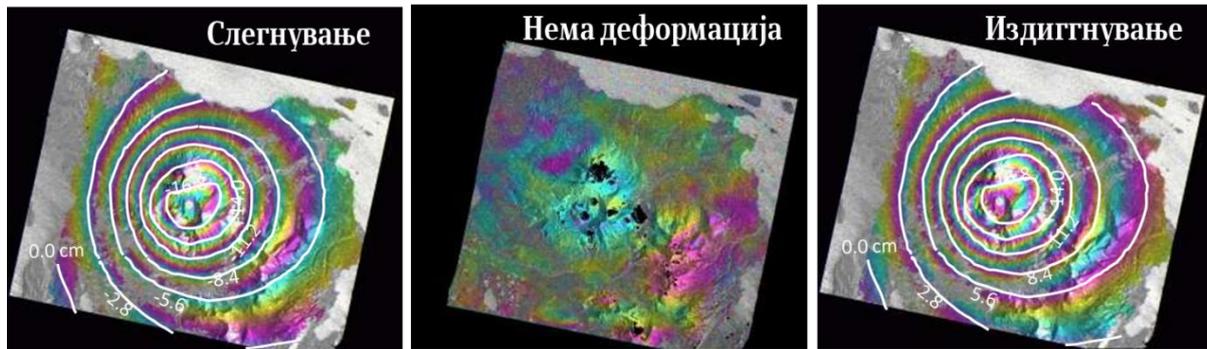
3.2.1 Интерпретација на деформациската компонента

Во практичните апликации на *DInSAR*, клучно е да се разбере границата на мерливоста на поместувањата и условите под кои фазниот сигнал останува кохерентен. Бидејќи радарот ја мери фазата на електромагнетниот бран, секое поместување на теренот во *LOS* насоката предизвикува фазна промена пропорционална на тоа растојание. Со изедначување на математичкиот израз за деформациската компонента од релација (31), со една целосна фазна ротација (2π), се добива **граничната вредност на мерливо поместување помеѓу две аквизиции без фазна неодреденост** [44] [53], согласно следнава релација:

$$2\pi = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS} \rightarrow d_{LOS} = \frac{\lambda}{2} \quad (34)$$

Кај диференцијалните интерферограми, $\lambda/2$ има функција слична на висинската неодреденост (Δh_{amb}) кај топографските интерферограми што се користат за креирање ДЕМ. Во топографскиот случај, висинската неодреденост ја дефинира висинската разлика што предизвикува една колоритна низа (*fringe*), додека во диференцијалниот случај $\lambda/2$ ја претставува вредноста на релативното поместување кое предизвикува една колоритна низа (*fringe*) во *LOS* насока. Со други зборови, секоја колоритна низа претставува јасен индикатор за релативно поместување од $\lambda/2$ во *LOS* насоката. Колку повеќе колоритни низи се забележуваат, толку поголемо е вкупното поместување, а нивната форма и распоред откриваат каде, како и во која насока се случиле промените на теренот. Тука важно е да се напомене дека распоредот на боите во колоритните низи е директно врзан со насоката на поместување на теренот. Ако градиентот на боите во колоритните

низи се менува во однапред дефиниран редослед (на пример, сина → зелена → жолта → црвена), тоа укажува на приближување на теренот кон сателитот, односно издигнување на теренот во LOS насоката. Обратниот редослед на боите сигнализира оддалечување на теренот од сателитот, односно негово слегнување. За правилна интерпретација, распоредот на боите мора да биде конзистентен низ сите интерферограми, а насоката на поместувањето секогаш се одредува во однос на избраната референтна точка.



Слика 42 Колоритни низи (*fringes*) при различни нивоа на деформации (модифицирано од [81])

Слично како и кај интерферограмите со доминантна топографска компонента, и кај диференцијалните интерферограми примената на фазното развивање (*phase unwrapping*) претставува клучен чекор за добивање на корисни резултати. Притоа, дискретните обрасци на колоритни низи (*fringes*), кои првично ја прикажуваат фазата во рамки на ограничувањето од $\lambda/2$, се трансформираат во континуиран деформациски модел. Овој модел овозможува да се утврди целосната вредност на деформациите и нивната просторна распределба, надминувајќи ја фазната неодреденост што постои во оригиналниот интерферограм.

3.2.2 Интерферометриска фазна кохерентност

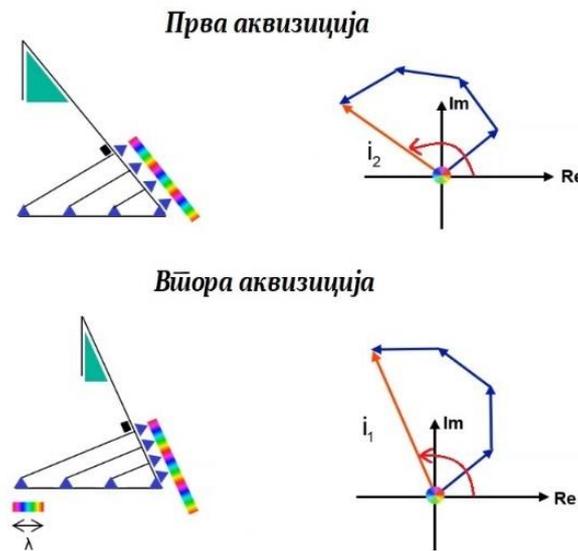
Во поглавјето 2.3.7 Расејување на електромагнетните бранови е наведено дека фазната вредност на секој пиксел во SAR снимката може да се опише како збир од две компоненти: растојанието (R) од сензорот до расејувачот и фазната компонента поврзана со сложениот процес на расејување (ε_{scatt}) во рамките на пикселот (кога во рамките на една резолуциона ќелија има повеќе расејувачи). Истото го изразивме согласно следната релација:

$$\varphi(R) = \frac{4\pi}{\lambda} R + \varepsilon_{scatt} \quad (35)$$

Кохерентноста меѓу две SAR аквизиции со идентична или речиси идентична геометриска конфигурација зависи пред сè од стабилноста на внатрешната расејувачка структура (ε_{scatt}) со текот на времето. Доколку расејувачката структура остане непроменета, фазната разлика ќе биде конзистентна, што резултира со висока кохерентност. Во спротивно, промени во расејувањето (на пример, поради вегетација, вода или снег) доведуваат до декорелација и ниска кохерентност.

При дефинирањето на интерферометриската фаза во релацијата (24) претпоставивме дека расејувањето од површината останува непроменето во временскиот интервал меѓу двете аквизиции, односно дека важи условот $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Во пракса, **оваа претпоставка не секогаш е исполнета**. Всушност, степенот на сличност на расејувањето меѓу двете аквизиции претставува директен показател за интерферометриската кохерентност. [120] [53]

Интерферометриската кохерентност (или **корелацијата**) претставува мерка за сличноста на фазните компоненти на сигналот во истата резолуциона ќелија при две SAR аквизиции. Кога фазните компоненти остануваат конзистентни со текот на времето, интерферограмот покажува висока кохерентност, додека секоја значајна промена доведува до намалена кохерентност и појава на шум во фазните податоци. [35] [119]



Слика 43 Различна разместеност на расејувачите поради различна геометрија при две SAR аквизиции [24]

На Слика 43 е претставена разликата на интерферометриските фази поради неидентичниот агол на аквизиција на двете SAR снимки. Дополнително треба да се земе предвид и можноста за меѓусебно разместување на расејувачите со текот на времето, што дополнително би ја зголемило таа разлика. Тоа придонесува за појавата на некохерентност (декорелација) на интерферометриската фаза.

Генерално, овие промени можат да се појават поради геометриски и темпорални ефекти. Геометриските ефекти се појавуваат кога аголот или положбата на аквизиција при двете SAR аквизиции не е идентичен, што доведува до различен распоред на расејувачите во рамките на истата резолуциона ќелија, додека темпоралните ефекти се појавуваат кога распоредот на расејувачите се менува со текот на времето поради природни процеси или човечки активности.

Во таа смисла, вообичаено се разликуваат два основни типа на фазна декорелација:

- **Геометриска декорелација**, предизвикана од геометриските ефекти и
- **Темпорална декорелација**, предизвикана од темпоралните (временски) ефекти.

Интерферометриската кохерентност (γ) за пикселот p помеѓу SAR снимките i и k се изразува слично на релацијата (21) за нормализирана кохерентност:

$$\gamma_p^{i,j} = \frac{\sum_{N_p} \text{Im}g_i \cdot \text{Im}g_k^*}{\sqrt{\sum_{N_p} |\text{Im}g_i|^2 \cdot \sum_{N_p} |\text{Im}g_k|^2}} \quad (36)$$

На Слика 44 е прикажана графичка интерпретација на релацијата (36) за интерферометриската кохерентност. Важно е да се нагласи дека пресметката се врши врз основа на т.н. проценувачки прозорец (*estimation window*), кој опфаќа повеќе пиксели околу централниот пиксел (N_p). Во

прикажаните примери прозорецот е со димензии 7×7 пиксели, сите со идентични амплитудни вредности.

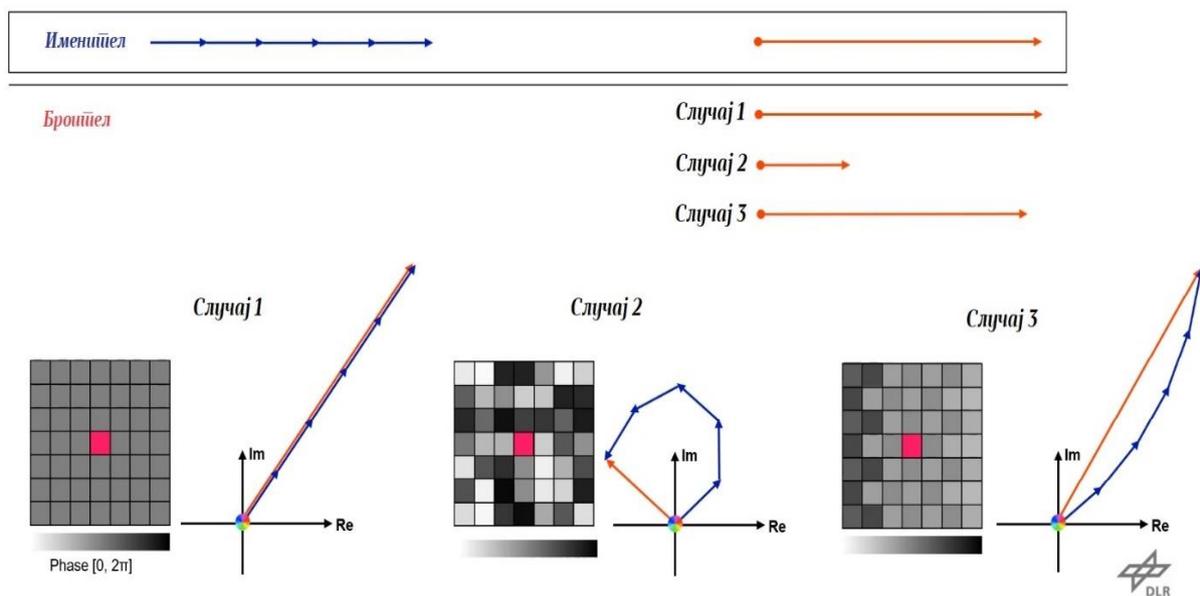
Во релацијата, *именијелот* го претставува максималниот можен интензитет на резултантниот вектор од фазите на пикселите во проценувачкиот прозорец, додека *броијелот* го означува интензитетот на векторот добиен со збир на сите интерферометриски фази со нивните агловни вредности. [24]

Притоа, се издвојуваат три случаи:

Случај 1. Идентични интерферометриски фази во сите пиксели \rightarrow кохерентноста е 1.

Случај 2. Целосно различни интерферометриски фази \rightarrow интензитетот на резултантниот вектор драстично се намалува, кохерентноста ≈ 0.3 .

Случај 3. Релативно слични интерферометриски фази \rightarrow кохерентноста е висока, околу 0.9.



Слика 44 Графичка интерпретација на интерферометриската кохерентност (модифицирано од [24])

Кохерентната мапа се добива со пресметување на интерферометриската кохерентност (γ) за секој пиксел во интерферограмот, при што проценувачкиот прозорец се придвижува низ целата слика. Вредноста на кохерентноста секогаш е позитивна и се движи во интервалот од 0 до 1. Кохерентност од 0 означува целосен фазен шум и графички се прикажува со црна боја, додека кохерентност од 1 претставува совршена корелација (отсуство на шум), што во мапата се прикажува со бела боја. Во пракса, интерферометријата се смета за успешна доколку кохерентните вредности се движат во интервалот 0.6 – 1 (Слика 45).

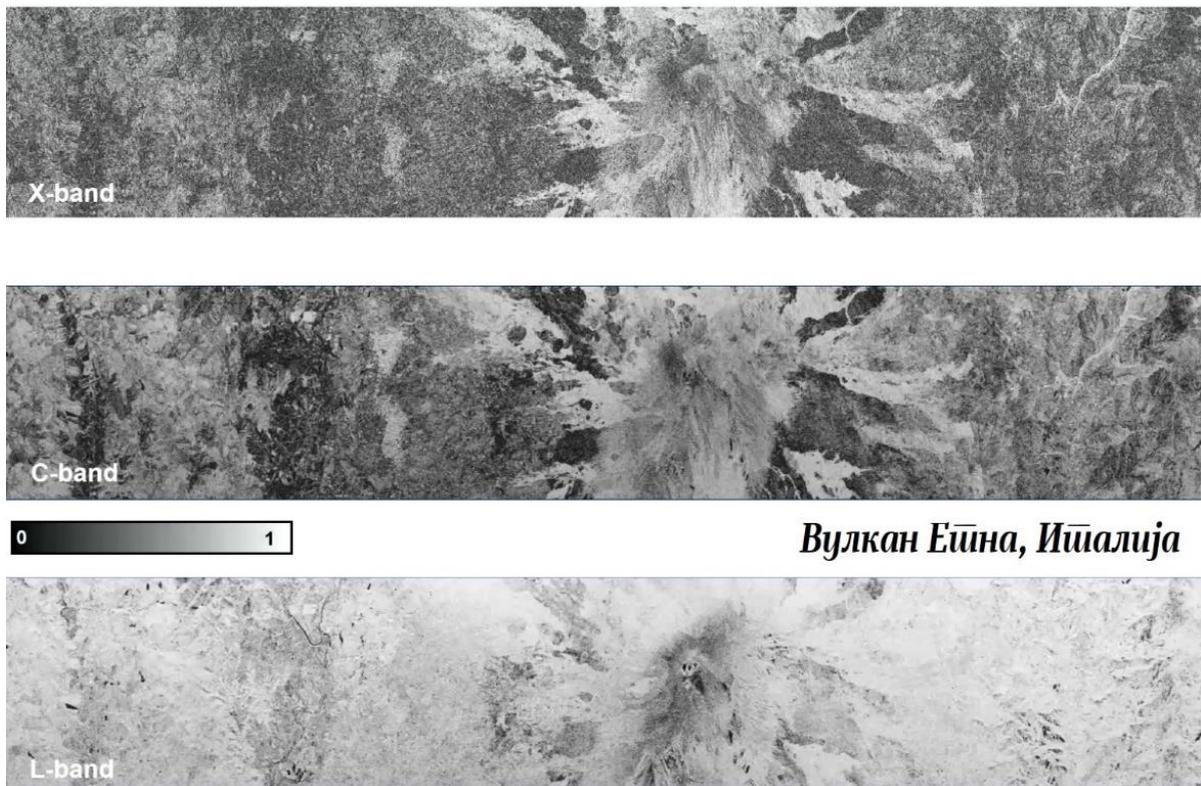
Согласно досега приложеното интерферометриската кохерентност зависи од стабилноста на геометрискиот пат и внатрешната расејувачка структура. Сепак, дури и во услови кога овие фактори се релативно стабилни, постојат *локални ограничувања* кои можат да влијаат врз точноста и доверливоста на интерферометриската фаза.

Интерферометриската фаза е периодична во интервалот $[-\pi, +\pi]$ радијани, што одговара на една цела бранова должина (λ). Поради ова ограничување, фазната разлика меѓу соседни пиксели мора да остане во одредени граници за фазното развивање да биде стабилно.

Во интерферометријата постои т.н. $\lambda/4$ **правило**, кое претставува емпириски критериум според кој фазната разлика меѓу два соседни пиксели не треба да надминува $\lambda/4$, односно $\pi/2$ радијани (90°). Доколку оваа граница се надмине, постои голем ризик алгоритмот за фазно демодулирање погрешно да ја интерпретира вистинската фаза, што води до фазна неодреденост (*phase ambiguity*). [49] [53]

Ова правило е особено важно во *DInSAR* обработките, каде обезбедува доверливо фазно развивање во области со големи деформациски градиенти или сложен релјеф и со тоа ја зголемува точноста на добиените резултати.

Кохерентни мапи



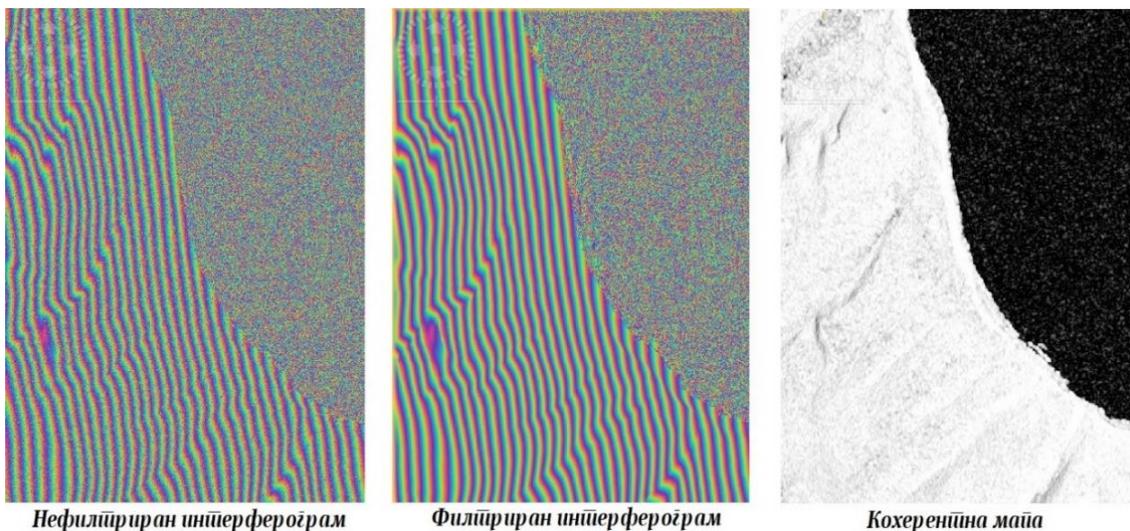
Вулкан Етна, Италија

Слика 45 Кохерентни мапи на X, C и L-band сигналите на истата површина околу вулканот Етна, Италија [24]

3.2.3 Филтрирање и фазно развивање (*phase unwrapping*) во диференцијална интерферометрија

Во рамките на диференцијалната интерферометрија, обработката на интерферограмите е значително покомплексна отколку кај интерферометријата насочен кон генерирање на ДЕМ, поради поголемото присуство на шум, атмосферски варијации и декохерентност кои ја нарушуваат фазната стабилност. За да се обезбеди непречено фазно развивање (*phase unwrapping*) и да се минимизира ризикот од грешки во интерпретацијата, потребен е дополнителен чекор, **филтрирање на интерферограмот**, со кое се намалува случајниот шум и се нагласуваат кохерентните структури. Затоа, во практиката, филтрирањето и фазното развивање претставуваат тесно поврзани постапки што заеднички овозможуваат стабилна реконструкција на фазата, врз која потоа може да се изведе издвојување на деформациската компонента.

Филтрирањето претставува неопходен чекор за подобрување на квалитетот на интерферометриската фаза, при што се применуваат методи базирани на просторна и фреквентна анализа. [53] Најраспространет е *Goldstein филтрирање* [48], кој врши адаптивно потиснување на високофреквентниот шум и истовремено го нагласува сигналот во областите со висока кохерентност. Покрај него, често се користат и *адаптивни просторни филтри* [98] [90], кои го прилагодуваат нивото на филтрирање во зависност од локалната стабилност на фазата, со што се задржуваат јасните граници и структурните детали. На овој начин се обезбедува интерферограм со редуциран шум и стабилизирана фаза, погоден за фазно развивање. Сепак, потребна е претпазливост, бидејќи прекумерното филтрирање може да предизвика намалување на просторната резолуција и маскирање на деформациски обрасци. Затоа секогаш е неопходен внимателно избалансиран пристап, кој ќе овозможи ефективна редукција на шумот, а истовремено ќе ги зачува клучните структурни детали во интерферограмот.



Слика 46 Приказ на филтриран интерферограм со Goldstein филтрирање (модифицирано од [80])

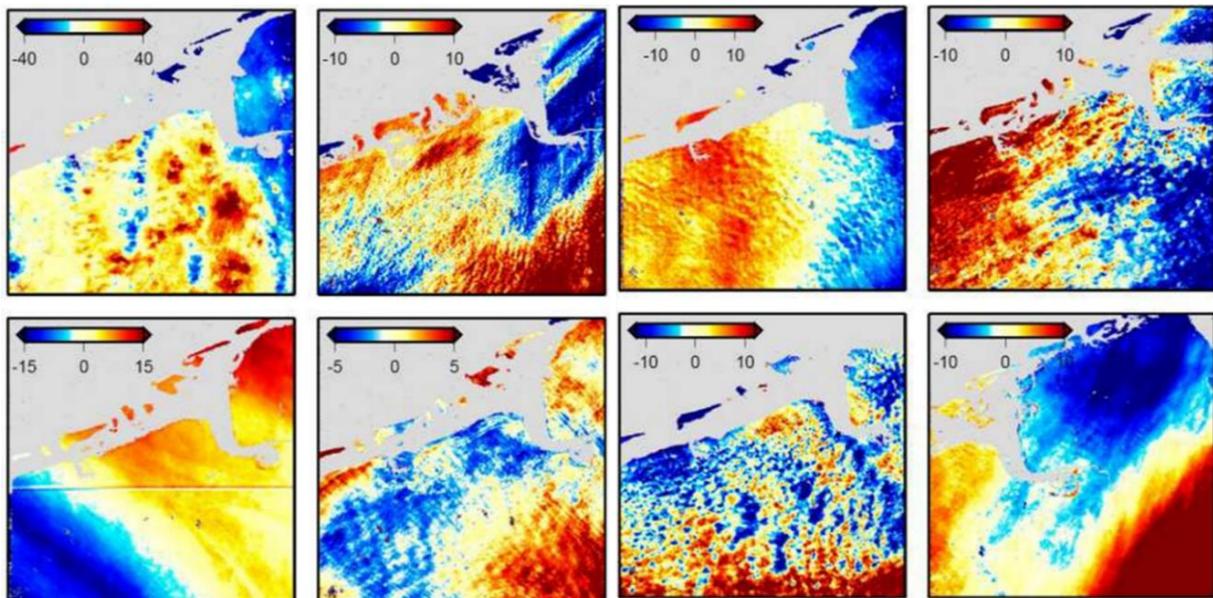
Специјален тип на филтрирање е *multilooking*. *Multilooking* е техника за намалување на шумот и подобрување на кохерентноста на интерферограмите преку осреднување на фазните вредности на соседните пиксели во рамките на дефиниран прозорец. На тој начин се редуцира варијабилноста предизвикана од случајниот шум и се добива посигурна проценка на фазната информација. Ефектот од *multilooking* е подобрување на односот сигнал-шум (*Signal to Noise Ratio - SNR*), што директно го олеснува фазното развивање и интерпретацијата на интерферограмот. Сепак, оваа постапка води кон намалување на просторната резолуција, па затоа изборот на бројот на „looks“ претставува компромис меѓу стабилноста на фазата и зачувувањето на просторните детали. [50] [19]

Фазното развивање (*phase unwrapping*) претставува завршен чекор во обработката на интерферометриските податоци, со кој модулираната фаза ограничена во интервалот $[-\pi, \pi]$ се трансформира во немодулирана (континуирана) фаза. Во рамките на диференцијалната интерферометрија важат истите принципи и методолошки пристапи за фазно развивање како и при обработката на интерферометриската фаза со доминантна топографска компонента. Тоа значи дека и овде се применуваат идентични техники за демодулирање на фазата, со цел да се обезбеди точна реконструкција на континуираното фазно поле. За фазното развивање да биде сигурно и стабилно, потребно е да се исполни претходно споменатиот $\lambda/4$ услов, кој бара разликите

во фазата меѓу соседни пиксели да не надминуваат една четвртина од брановата должина. Ако ова ограничување се наруши, фазните скокови стануваат премногу големи за алгоритмот за фазното развивање (*phase unwrapping*) да ги следи коректно, што доведува до фазна неодреденост и појава на декохеренција. Такви ситуации најчесто се среќаваат во области со нагли и интензивни деформации, на пример, кај раседи активирани од земјотреси или на рабовите на активни свлечишта, каде соседните пиксели можат да покажат разлики поголеми од $\lambda/4$ и интерферограмот да изгуби кохерентност во тие делови.

3.2.4 Атмосферски ефекти

Иако радарските системи што работат во микробрановиот опсег имаат значајна предност пред оптичките сензори, бидејќи овозможуваат континуирани набљудувања независно од дневно-ноќниот циклус и речиси без ограничувања од облачност или врнежи, сепак фазната компонента на снимките останува особено чувствителна на атмосферските услови. Секој сигнал што патува низ тропосферата и јоносферата претрпува извесно доцнење, кое не е резултат на реална деформација на земјината површина, туку на променливиот состав и физичките својства на атмосферските слоеви. [53] [122] [72]

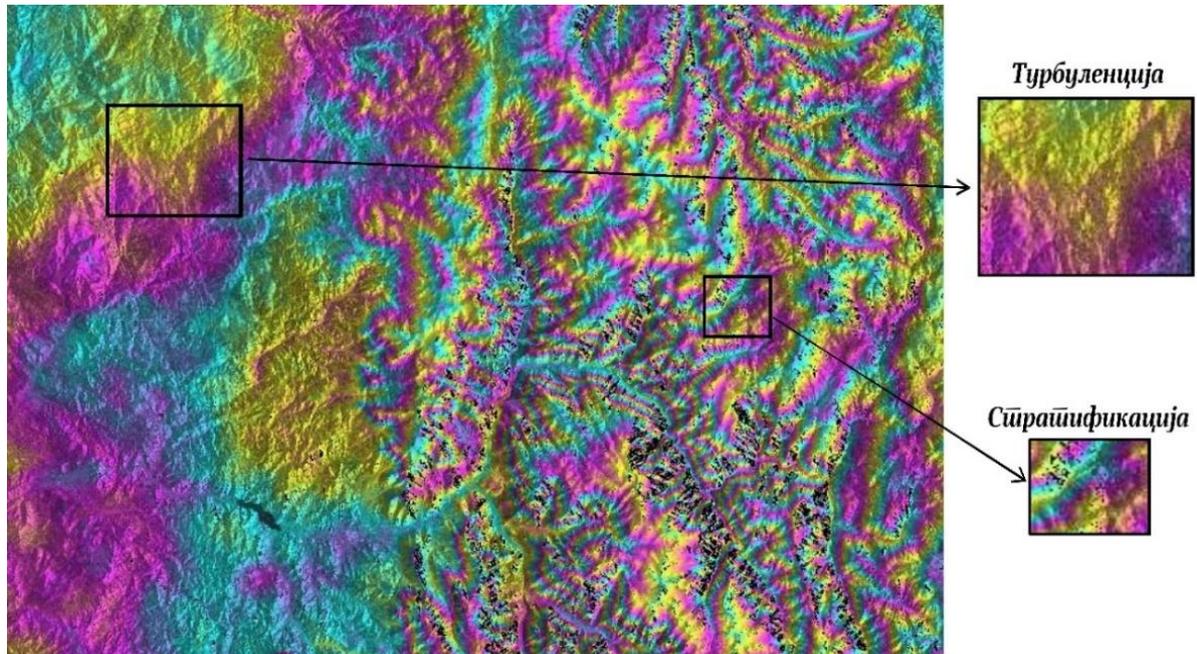


Слика 47 Осум диференцијални интерферограми кои покриваат иста површина од $100 \times 100 \text{ km}$ кои покажуваат лажни деформации на површината заради присуство на атмосферската компонента [53]

Најдолниот слој од атмосферата е *тропосферата*, која се протега до приближно 20 km над Земјината површина (во зависност од географската ширина и сезоната). Во неа се содржани околу 80% од вкупната маса на атмосферата и речиси целата водена пара и аеросоли. Просторните и временските разлики во температурата, воздушниот притисок и содржината на водена пара предизвикуваат варијации на рефракцискиот индекс, а со тоа и промени во брзината на радарскиот сигнал, што резултира со регистрирање на фазата со одредено атмосферско нарушување. Поради чувствителноста на фазата, овие ефекти често се манифестираат како шум или систематска грешка во интерферограмите, што ја ограничува точноста на *DInSAR* анализите, особено при мониторинг на мали деформации. Во вакви услови, промената на релативната

влажност од 20% меѓу два SAR снимка може да доведе до фазна грешка што одговара на привидна деформација од околу 10 cm. [122]

Големите разлики меѓу диференцијалните интерферограми добиени за истата област, ја потврдуваат доминантната улога на атмосферата во генерирање на “лажни” деформации. Ова ја нагласува потребата од употреба на техники на временски серии и користење на мулти-интерферограмски пристапи (*PS* и *DS*), кои овозможуваат моделирање на овие атмосферските ефекти и издвојување на стабилниот сигнал на вистинските деформации.



Слика 48 Приказ на фазниот образец при турбуленција и спиритификација (модифицирано од [80])

Меѓу различните атмосферски влијанија, тропосферските ефекти претставуваат најизразен извор на шум, кој многу често ја засенува реалната деформациона компонента. Тие можат да се поделат на две компоненти:

- Ефект на атмосферска турбуленција и
- Ефект на атмосферска спиритификација.

3.2.5 Атмосферска турбуленција

Тропосферата, како најнизок дел од атмосферата, претставува доминантен извор на варијации кои влијаат врз фазните вредности на SAR сигналите. Најголемиот дел од атмосферската турбуленција се јавува во слојот блиску до површината на Земјата (приближно до 2-3 km височина), каде постојано се одвива интензивно мешање на воздухот поради разлики во температурата, притисокот и влажноста.

Овие микрометеоролошки процеси доведуваат до локални промени во рефрактивниот индекс на атмосферата, што предизвикува просторни варијации на фазното доцнење, познати како **атмосферски фазен прозорец (Atmospheric Phase Screen-APS)**. [53] За разлика од интерферограмите генерирани со *single-pass* интерферометријата, каде ваквите ефекти се елиминираат бидејќи условите се идентични во двете аквизиции, кај *repeat-pass* интерферо-

метријата турбулентните ефекти секогаш се присутни и се манифестираат како колоритни низи (*fringes*) што не се резултат на реална деформација на површината.

Важна карактеристика на атмосферскиот прозорец (*APS*) е тоа што фазните нарушувања предизвикани од турбуленцијата во тропосферата имаат висока просторна корелација и наликуваат на облачни структури, иако облаците самите по себе не се видливи во амплитудните SAR снимки. Од временска перспектива, овие нарушувања се силно променливи и краткотрајни, што значи дека дури и SAR аквизиции со многу мал временски интервал можат да прикажат значително различни атмосферски ефекти. [122] [53]

Оваа непредвидливост и привидна структурираност на фазните нарушувања претставуваат сериозен предизвик при интерпретацијата на интерферограмите. Поради тоа, современите мулти-интерферограмски техники ја искористуваат просторната корелираност на турбулентните ефекти за нивно моделирање и елиминирање од интерферограмската фаза, со што се овозможува појасно издвојување на вистинскиот сигнал на деформација.

3.2.6 Атмосферска стратификација

Покрај турбулентните појави, фазните аномалии во интерферограмите можат да бидат предизвикани и од вертикалната стратификација на атмосферата. Овој ефект настанува поради присуство на слоеви со различна брзина на пропација на сигналот, односно различни индекси на рефракција на различни надморски височини. Како последица, фазното доцнење често се појавува како систематска варијација што е силно корелирана со топографијата.

Овој ефект е особено нагласен во планинските области, каде што вертикалните градиенти на температурата, притисокот и влажноста создаваат услови за појава на фазни доцнења што се силно зависни од надморската височина. Како резултат, во интерферограмите се појавуваат карактеристични колоритни низи (*fringes*) кои можат погрешно да се протолкуваат како реални деформации. За да се избегне тоа, стратификациските ефекти најчесто се моделираат преку анализа на зависноста меѓу фазното доцнење и топографијата. Вообичаено, тие се моделираат преку проценка на релацијата меѓу висинската компонента и фазното доцнење, која најчесто се апроксимира со едноставна линеарна функција. Овој пристап овозможува проценка и делумна елиминација на стратификациските ефекти директно од податоците. [25]

3.3 КОМПОНЕНТИ НА ДИФЕРЕНЦИЈАЛНАТА ИНТЕРФЕРОМЕТРИСКА ФАЗА

Со оглед на досега изнесеното, може да се заклучи дека диференцијалната интерферограмска фаза покрај деформационската компонента, ги содржи: топографската компонента, атмосферската компонента и шумот (*noise*).

Во општ случај, диференцијалната интерферометриска фаза се изразува како збир од нејзините главни компоненти, согласно релација (37):

$$\Delta\varphi_{DInSAR} = \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{topography}^{residual} + \Delta\varphi_{atmsphere} + \Delta\varphi_{noise} \quad (37)$$

3.4 ПОТРЕБА ОД МУЛТИ-ИНТЕРФЕРОГРАМСКИ *InSAR* ТЕХНИКИ

Иако диференцијалната интерферометрија овозможува да се определат поместувања кои претставуваат проекција на тридимензионалниот деформациски вектор во правецот на линијата на аквизиција (*LOS*) со висока просторна и временска резолуција, резултатите не секогаш ја одразуваат реалната деформација. Интерферометриската фаза, покрај деформациската компонента, секогаш содржи и учество од атмосферски ефекти, топографски резидуали и шум (фазна декорелација). Токму овие дополнителни компоненти ја ограничуваат прецизноста и доверливоста на класичниот *DInSAR* пристап.

Атмосферските ефекти претставуваат посебен предизвик, бидејќи фазното доцнење е просторно корелирано и може да генерира „лажни“ шеми на деформации. Од друга страна, фазната декорелација се јавува како резултат на разликите во геометријата на аквизициите и временските промени на расејувачите, особено изразена кај вегетираните површини.

Дополнително, и покрај примената на глобални дигитални модели на теренот, топографската компонента никогаш не може целосно да се отстрани поради нивната ограничена точност и чувствителноста на интерферограмите на резидуални грешки, особено при мали нормални базни вектори. Оттаму, класичниот *DInSAR* пристап, иако претставува значаен и широко користен метод, неретко создава резултати што бараат внимателна анализа и дополнителна корекција за да се добие доверлива претстава за реалните деформации.

Ограничувањата што произлегуваат од атмосферските ефекти, топографските резидуали и фазната декорелација ја наметнуваат потребата од развој на напредни **мулти-интерферограмски техники**. Наместо да се потпрат на еден или неколку интерферограми, овие методи користат долги временски серии од *SAR* набљудувања. Преку заедничка анализа на голем број интерферограми, можно е да се издвојат пиксели со стабилни расејувачки својства (*Permanent Scatterers – PS* или *Distributed Scatterers – DS*), кај кои фазната информација е помалку подложна на шум и декорелација. На тој начин, секоја компонента од интерферометриската фаза може поединечно да се моделира и коригира, оставајќи ја деформациската компонента како доминантен чинител во интерферометриската фаза. Овој пристап не само што овозможува подобра точност, туку и значително го зголемува доверливиот број на пиксели во рамките на анализираниот регион, што е клучно за просторна континуираност на резултатите.

Примената на мулти-интерферограмски техники овозможува добивање на прецизни временски серии на деформации со точност од **неколку милиметри** и за големи просторни површини. Благодарение на нивната способност да ги редуцираат атмосферските влијанија, топографските резидуали и шумот од декорелација, овие методи се наметнаа како стандард во современите *InSAR* анализи. Алгоритмите како ***Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR)*** [36] [39] [63] [57], ***Quasi Permanent Scatterer InSAR (QPSInSAR)*** [98], ***Small Baseline Subset (SBAS)*** [4], како и ***Phase Linking*** [55] пристапите (на пр. *SqueeSAR* [38], *Adaptive Phase Linking* [58] и други), кои овозможуваат комбинирана употреба на *PS* и *DS* расејувачи, претставуваат незаменливи алатки за мониторинг на геодинамички процеси, стабилност на инфраструктурата и управување со природни ризици.

Во продолжение се разработени теоретските основи и методолошките пристапи на овие мулти-интерферограмски техники, кои претставуваат темел за нивната понатамошна примена и валидација во рамките на оваа дисертација.

3.5 PERMANENT SCATTERER INSAR (PSINSAR)

3.5.1 Предуслови за развој на PSINSAR

По лансирањето на сателитот *ERS-1* во 1991 година, научната заедница конечно доби пристап до континуирани мулти-темпорални SAR снимки со висока орбитална стабилност. Веќе во првиот месец по лансирањето беше изработен првиот SAR интерферограм, што предизвика вистински подем на *InSAR* истражувањата [101]. Сепак, со натамошната примена на техниката се појавија две клучни ограничувања: *атмосферскиите ефекти* и *фазнаа декорелација*.

Овие проблеми делумно го намалија иницијалниот ентузијазам, но истовремено ја насочија заедницата кон развој на нови алгоритми што ќе овозможат поквалитетна анализа на долгорочни деформациски процеси.

Кон крајот на деведесеттите години од минатиот век беше забележано дека антропогените структури како: згради, мостови и инфраструктура задржуваат многу висока кохерентност дури и во интерферограми со временски базни вектори⁵ од повеќе години [115]. Овој увид доведе до идејата наместо да се бара совршена кохерентност во целото подрачје, може да се идентификуваат *постојани стабилни расејувачи (Permanent Scatterers, PS)* кои обезбедуваат сигурен сигнал при секакви услови.

Паралелно, во истиот период беа предложени и методи како *interferogram stacking* [104] [109], каде што основниот принцип се заснова на комбинирање на повеќе независни интерферограми со цел да се пресмета средна вредност на интерферометриската фаза. Со оваа постапка значително се намалува варијансата на шумот и се овозможува појасно издвојување на долгорочните деформациски трендови од фазните варијации. Иако овој пристап претставуваше важен чекор напред, неговата примена е ограничена од филтрирањето на интерферометриската фаза, што доведува до намалување на просторната резолуција и отежнува идентификација на локализирани поместувања со мал интензитет.

Permanent Scatterer (PSINSAR) техниката е развиена кон крајот на 90^{ти} години од минатиот век од SAR тимот при *Политехничкиот универзитет во Милано (POLIMI)* предводен од *A. Ferretti, F. Rocca* и *C. Prati*, со цел да се надминат клучните ограничувања на класичната интерферометрија [39] [36]. Основната карактеристика на оваа техника е користењето на една референтна (*master*) SAR снимка за генерирање на повеќе диференцијални интерферограми, при што анализа се врши исклучиво врз пиксели кои покажуваат временска кохерентност, т.н. *перманентни расејувачи (Permanent Scatterers)*. Посебна предност на техниката е тоа што овозможува искористување на сите достапни SAR снимки, вклучително и оние со големи базни вектори, бидејќи перманентните расејувачи не се подложни геометриска декорелација за разлика од површините со дистрибуирано расејување. На овој начин, *PSINSAR* значително ја зголемува густината на податоците во временската серија и овозможува извонредна стабилност на сигналот. Со ваквата иновација, техниката брзо стана референтен пристап во областа на мулти-интерферограмските техники, врз кој подоцна беа развиени бројни варијации и подобрувања.

⁵ Временскиот базен вектор (*temporal baseline*) претставува временскиот интервал помеѓу две SAR аквизиции користени за формирање на интерферограм.

3.5.2 Основен концепт на *PSInSAR* техниката

Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR) техниката претставува напреден мулти-интерферограмски пристап кој овозможува надминување на проблемите со временска и геометриска декорелација преку издвојување на стабилни пиксели со “точкасто” расејување, т.н. *перманентни расејувачи*. За разлика од класичните интерферометриски методи, каде должината на базните вектори често претставува ограничувачки фактор, *PSInSAR* овозможува користење на сите достапни SAR снимки во рамки на еден заеднички сет поврзан со единствена референтна (*master*) SAR снимка. На тој начин методологијата се фокусира на временски кохерентните пиксели (*PS* точки), кои обезбедуваат висока стабилност на сигналот и значително поголема густина на информации во целата временска серија.

PSInSAR техниката се реализира преку систематски редослед од неколку клучни чекори:

1. *Генерирање на диференцијални интерферограми;*
2. *Селекција на перманентни расејувачи;*
3. *Просторно – временско моделирање*⁶:
 - 3.1. *Локално моделирање (мала површина);*
 - 3.2. *Атмосферско (APS) моделирање (голема површина);*
4. *Конструирање на временски серии на поместувања на PS точки.*

Првите два чекори создаваат основна рамка, врз која се развиваат двете форми на просторно-временско моделирање. За појасно изнесување на теоретската основа, прво ќе го разгледаме поедноставниот случај, т.е. *локално моделирање*, применливо на ограничени области (до приближно 1 km^2), каде што атмосферските влијанија можат да се сметаат за хомогени и нивниот ефект се неутрализира преку избор на референтна точка. Во такви услови, атмосферската компонента ($\Delta\varphi_{atmosphere}$) од релација (37) може да се занемари, па интерферометриската фаза на *PS* точките се моделира во функција на *линеарната временска зависност (временскиот базен вектор B_t) на деформациската компонента ($\Delta\varphi_{displacement}$) и зависноста од нормалниот базен вектор (B_n) на топографскиот остаток ($\Delta\varphi_{topography}^{residual}$)*.

Концептот на локалното просторно-временско моделирање е ефикасен, но останува ограничен на релативно мали области, каде што атмосферските ефекти може да се сметаат за приближно хомогени и затоа нивното влијание се занемарува. За поширока и стандардна примена на *PSInSAR* техниката, сепак, неопходно е елиминирање на атмосферската компонента. Ова се постигнува преку концептот на *атмосферско (APS) моделирање*, кое е применливо без разлика на големината на анализираната површина [36].

Во овој чекор, моделирањето се заснова на мрежа од соседни *PS кандидати*, кои претставуваат подмножество на *PS* точки со највисока вредност на *индекс на амплитудна стабилност (Amplitude Stability Index)*⁷. Овие точки служат како стабилни репери за просторна анализа. Фазните разлики помеѓу конекциите на соседните *PS* кандидати речиси целосно се

⁶ Концептот на локално и атмосферското моделирање е инкорпориран во SARPROZ софтверот.

⁷ Индексот на амплитудната стабилност дејствено е образложен во подглавјето 3.5.4 Селекција на перманентни расејувачи

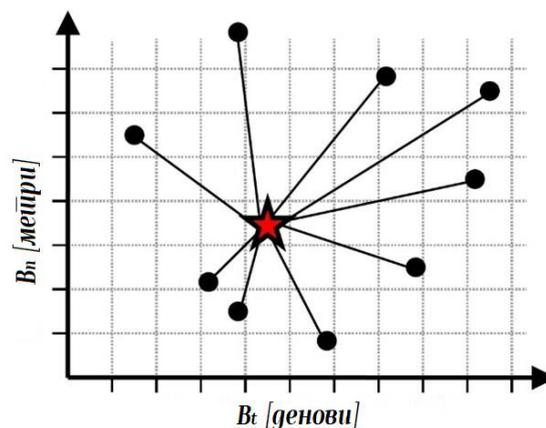
ослободени од атмосферските влијанија, бидејќи атмосферската компонента е просторно корелирана, односно релативно хомогена на мали растојанија, иако е временски варијабилна. За таа цел, мрежата на *PS* кандидати мора да биде со соодветна густина и правилен распоред, односно соседните точки треба да бидат приближно рамномерно распределени и со максимални меѓусебни растојанија до 500 метри.

Откако ќе се воспостави ваквата мрежа, фазните разлики се обработуваат со примена на просторно-временско моделирање, користејќи ги истите принципи како и во локалното моделирање со користење на референтна точка, со што се издвојуваат компонентите на деформацијата и на топографскиот резидуал за сите *PS* кандидати. Во секој *PS* кандидат, атмосферската компонента се определува како резидуалена фазна вредност, добиена како резултат на разликата на $\Delta\varphi_{displacement}$ и $\Delta\varphi_{topography}^{residual}$ компонентите од вкупната интерферометриска фаза. Во завршната фаза, преку интеграција и интерполација на добиените вредности, се пресметува атмосферската компонента за секоја точка во мрежата и се конструира *атмосферскиот прозорец (APS)* за целата анализирана област.

3.5.3 Генерирање на диференцијални интерферограми

PSInSAR техниката започнува со генерирање на сет од диференцијални интерферограми. За таа цел, од $N+1$ SAR аквизиции се генерираат N интерферограми, при што сите се формираат со иста референтна (*master*) снимка. Ваквиот пристап овозможува сите интерферограми да бидат усогласени и споредливи во рамките на една заедничка временска серија.

Референтната снимка се избира така што се минимизираат просторните и временските базни вектори. Просторната базна линија се дефинира како нормалното базно растојание (B_n) помеѓу орбиталните позиции на сателитот за даден пар аквизиции, додека временската базна линија (B_t) ја претставува временската дистанца меѓу нив. Со правилен избор на референтна снимка (на Слика 49 претставена како црвена ѕвездичка) се овозможува креирање на интерферограми со висока кохерентност и минимални геометриски и временски ефекти.



Слика 49 Приказ на креирање на интерферограми во *PSInSAR* (модифицирано од [57])

Во секој интерферограм, топографската фаза се моделира и се елиминира со употреба на дигитален елевациски модел. По оваа постапка, добиените резултати претставуваат *диференцијални интерферограми (DInSAR)*, сите генерирани врз основа на една референтна снимка кои ја сочинуваат основната база за натамошните чекори на *PSInSAR* техниката.

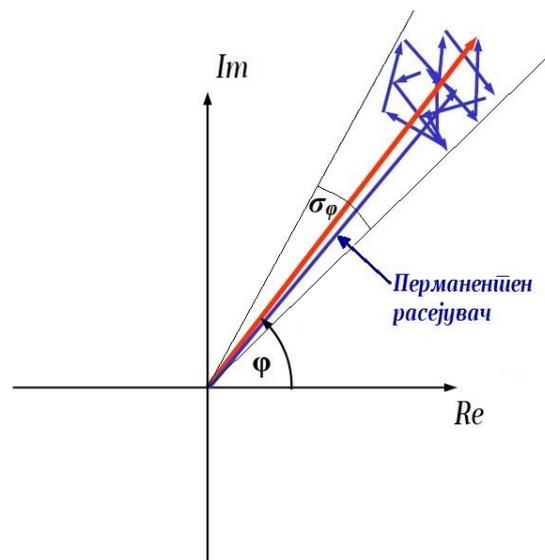
3.5.4 Селекција на перманентни расејувачи (PS точки)

PSInSAR техниката не се применува врз сите пиксели од анализираната област, туку само врз ограничен број стабилни точки што задржуваат висока кохерентност низ сетот SAR снимки кои се анализираат. За таа цел, треба да се дефинира некој критериум за нивна идентификација.

Интуитивно, првиот пристап е користење на интерферометриската кохерентност (γ) како мерило за селекција на PS точки. Согласно релацијата (36), вредноста на кохерентноста варира од 0 до 1, па со задавање праг може да се воспостави критериум за детекција. Сепак, овој индикатор се пресметува во рамки на т.н. проценувачки прозорец (*estimation window*) кој опфаќа повеќе пиксели околу централниот пиксел. Притоа, колку е поголем прозорецот, толку е поголема точноста на оваа вредност, но се намалува просторната резолуција и се губи можноста да се издвојат поединечни стабилни точки. Ако пак проценувачкиот прозорецот е премал, резолуцијата е висока, но сигурноста на проценката се намалува. Поради тоа, резултатот од ваквиот пристап најчесто е ограничен и нефункционален за оваа техника.

Подобри резултати при изборот на стабилни точки, без нарушување на просторната резолуција се постигнуваат со примена на поинаков пристап, кој се заснова на анализа на временската серија на амплитудните вредности за секој пиксел, кој е за прв пат дефиниран во [36]. За таа цел е потребен поголем број SAR аквизиции (обично над 30), што овозможува да се идентификуваат стабилни расејувачи. За разлика од фазата, која може да се оцени само по елиминација на нејзините компоненти, амплитудата е релативно инваријантна на фактори како атмосферски ефекти, орбитални неточности или топографски резидуали.

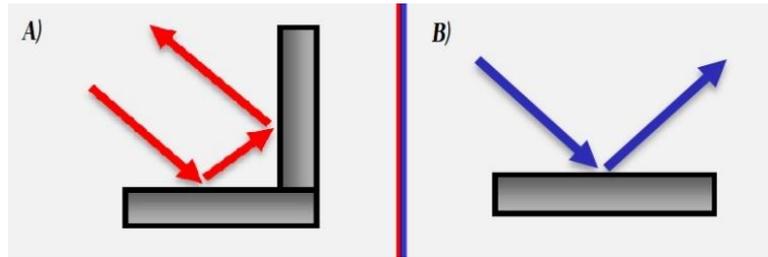
Математичката основа за користење на амплитудата како индикатор за фазна стабилност произлегува од статистичкиот модел на шумот во SAR системите. Амплитудата на сигналот во присуство на комплексен гаусов шум ја следи т.н. Рацова (*Rice*) распределба, чиј облик зависи од односот сигнал-шум (*SNR*). При ниско *SNR* распределбата се приближува до Рејлиева (*Rayleigh*) распределба, каде шумот е доминантен, додека при високо *SNR* ($SNR > 4$) таа тежнее кон Гацова распределба, што укажува на стабилна амплитуда и доминантен сигнал.



Слика 50 Графичка интерпретација на пиксел кој содржи перманентен расејувач (модификација од [57])

На Слика 50 е прикажана графичка интерпретација на расејувачкиот процес во рамките на една резолуциона ќелија, во која е присутен перманентен расејувач (најголемиот син вектор со почеток во координатниот почеток). Амплитудата, односно интензитетот на перманентниот расејувач е многу поголем во однос на интензитетите на сите останати расејувачи. Тоа овозможува фазната варијација (σ_φ) за измерената фаза (φ) на резултантниот вектор (црвениот вектор) да има мала варијација и покрај присуството на други расејувачки процеси во рамките на истата ќелија.

Висока амплитудна вредност најчесто имаат оние расејувачи во рамките на резолуционата ќелија кај кои се случува т.н. *диедрално расејување (dihedral scattering)*. Во тој случај речиси целата енергија пристигната до тој расејувач се рефлектира во правец кон сензорот (Слика 51a).



Слика 51 Графичка интерпретација на: а) Диедрално расејување б) Спекуларно расејување

Диедралното расејување се случува најчесто во урбаните средини, бидејќи овој тип на расејување е најкарактеристичен за објекти (згради), па затоа *PS* точките се најзастапени во урбаните средини, но, неретко може да се случи и кај карпестите предели.

Врз база на досега изнесеното може да се воспостави врска меѓу амплитудната и фазната стабилност, што би значело ако амплитудата на пикселот е конзистентна низ повеќе аквизиции, тогаш и неговата фаза има мала дисперзија. Со други зборови, шумот што ја нарушува фазата се одразува и врз варијабилноста на амплитудата, па затоа стабилната амплитуда е индиректен, но сигурен показател за стабилна фаза. Ова го оправдува користењето на *индекс на амплитудна дисперзија (D_A)* како практичен критериум за селекција на стабилни точки, согласно следнава релација:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (38)$$

Каде:

σ_A – Стандардната девијација на амплитудата на пикселот низ сите SAR аквизиции;

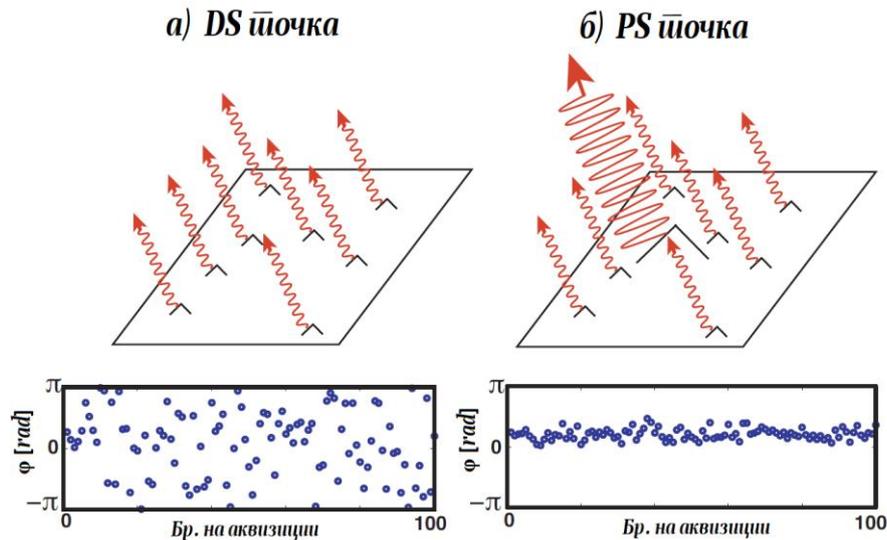
μ_A – Средната вредност на амплитудата на истиот пиксел низ сите SAR аквизиции [36] [39].

Индексот на амплитудната дисперзија (D_A) е одличен показател за присуството на перманентен расејувач во рамките на резолуционата ќелија, но малку е специфичен за дефинирање на стандарден праг при изборот на *PS* точки. За таа цел, во научната јавност повеќе се користи неговата модификација, т.н. *индекс на амплитудна стабилност (Amplitude Stability Index – ASI)*, согласно следната релација:

$$ASI = 1 - \frac{\sigma_A}{\mu_A} = 1 - D_A \quad (39)$$

Индексот на амплитудна стабилност (*ASI*) претставува нормализирана мерка за стабилноста на сигналот во времето. Тој добива вредности во интервалот [0, 1], при што повисоки вредности укажуваат на поголема стабилност на амплитудата и со тоа на поголема веројатност пикселот да

претставува перманентен расејувач. На овој начин, интерпретацијата станува интуитивна, пикселите со ASI блиску до 1 се најстабилни и се дефинираат како PS точки, додека оние со пониски вредности се исклучуваат. Практичната примена покажува дека користењето на ASI овозможува појасно дефинирање на стандарден праг за селекција на PS точки и е поинтуитивен критериум во споредба со индекс на амплитудна дисперзија (D_A).



Слика 52 Фазна варијација на а) Distributed Scatterer (DS) точка б) Permanent Scatterer (PS) точка (модификација од [57])

Во научната литература се среќаваат и други критериуми за идентификација на PS точките. Најпозната е методологијата предложена во [41], развиена во рамките на *StaMPS* алгоритмот, каде како конечен критериум се користи *фазната стабилност* на пикселот низ времето. Сепак, и овој пристап се потпира на иницијалната селекција со примена на индексот на амплитудна дисперзија (D_A), кој претставува наједноставниот и воедно најшироко применуван критериум за избор на PS точки.

3.5.5 Локално просторно – временско моделирање

По селектирањето на PS точките, понатамошните чекори на *PSInSAR* техниката се фокусираат само на обработка на нивните интерферометриски фазни вредности. За појасно изнесување на теоретската основа, прво ќе го разгледаме поедноставниот случај, односно алгоритмот на локалното просторно – временско моделирање, применлив на помали области (до приближно 1 km^2), каде што атмосферските влијанија можат да се сметаат за хомогени низ сите селектирани PS точки.

Бидејќи овие точки се целосно ослободени од компонентата предизвикана од ефектот за рамен терен (*flat-earth*), а во голема мера и од топографската компонента и шумовите во сигналот, интерферометриската фаза на секоја селектирана PS точка може да се изрази со релација (40):

$$\varphi_{PS_i} = \varphi_{disp} + \varphi_{topo}^{res} + \varphi_{atmo} + \varphi_{noise} \quad (40)$$

Релацијата (40) е суштински идентична со релацијата (37), со таа разлика што се однесува само на PS точките, но е изведена со поедноставена нотација, каде префиксот Δ е изоставен заради

полесно изразување во наредните релации (бидејќи се јавуваат разлики од фазните разлики, т.е. изрази од типот $\Delta(\Delta\varphi)$) и дополнително скратени се целосните називи на компонентите.

Земенувајќи ги веќе моделираните компоненти од релација (32) во релацијата (40) и имајќи предвид дека *PSInSAR* техниката се базира на сировите фазни разлики помеѓу референтната и секоја од секундарните SAR снимки (со модулирани фазни вредности), се добива следниот израз за интерферометриската фаза за секоја од селектираните *PS* точки:

$$\varphi_{PS_i} = W \left\{ \underbrace{-\frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS}}_{\varphi_{disp}} - \underbrace{\frac{4\pi B_n h_{err}}{\lambda R \sin \theta}}_{\varphi_{topo}^{res}} - \varphi_{atmo} - \varphi_{noise} \right\} \quad (41)$$

Каде:

$W \{ \}$ – Оператор за фазно модулирање (*wrapped phase*), со кој фазата е ограничена во интервалот $[-\pi; \pi]$;

d_{LOS} – Поместување во правецот на аквизиција (*Line of Sight*);

h_{err} – Грешка во надморската висина која настанува како резултат на неточности или неажурираност на користениот ДЕМ;

φ_{atmo} – Атмосферска фазна компонента;

φ_{noise} – Компонента на фазен шум, која вклучува термален шум, декорелациски ефекти, како и резидуали од веќе моделираните и коригирани компоненти.

Во релацијата (41) претставени се сите компоненти што ја сочинуваат интерферометриската фаза, добиена преку диференцирање на сировите фазни вредности помеѓу референтната SAR снимка и секоја од секундарните SAR снимки. Во релацијата, првите две компоненти φ_{disp} и φ_{topo}^{res} се моделирани, додека останатите две нема можност математички да се дефинираат. Притоа, доколку имаме вкупно N SAR снимки, за секоја селектирана *PS* точка ќе се добијат $N-1$ модулирани интерферометриски фази, кои се опишани со релацијата (41) [94] [39].

Треба да се нагласи дека деформациската компонента не е целосно моделирана. Вообичаен начин за нејзиното моделирање е претпоставката дека таа е **линеарна во време**. Иако оваа претпоставка не секогаш е случај во реалноста, таа претставува почетна основа за моделирање на деформациската компонента. Под оваа хипотеза, деформациската фазна компонента на дадена *PS* точка може да се изрази согласно следнава релација:

$$\varphi_{disp_{PS_i}} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{t,i} \cdot v \quad (42)$$

Каде:

$B_{t,i}$ – Временски базен вектор на i -тата секундарна аквизиција во однос на референтната SAR снимка;

v – Брзина на поместување на *PS* точката во правецот на аквизиција (*Line of Sight*).

Со замена на моделираната деформациска компонента од релација (42) во релацијата (41) се добива дефинитивниот израз за интерферометриската фаза во секоја селектирана *PS* точка:

$$\varphi_{PS_i} = W \left\{ -\frac{4\pi}{\lambda} B_{t,i} \cdot v - \frac{4\pi B_n h_{err}}{\lambda R \sin \theta} - \varphi_{atmo} - \varphi_{noise} \right\} \quad (43)$$

Треба да се потенцира дека *PSInSAR* претставува **релативна техника** и тоа истовремено во временска и во просторна смисла. Од временски аспект, фазните разлики секогаш се пресметуваат релативно во однос на избраната референтна *SAR* снимка, па затоа добиените интерферометриски фази не ја претставуваат апсолутната, туку релативната деформација низ временската серија [36] [57] [99]. Од друга страна, техниката е релативна и во простор, бидејќи модулираните фазни вредности за секоја *PS* точка се ограничени во интервалот $[-\pi; \pi]$ и сами по себе немаат физичко значење без нивно споредување со избрана **референтна *PS* точка**. Со други зборови, фазната информација е значајна дури тогаш кога ќе се изведе во однос на стабилна и добро дефинирана референтна точка, со што се добиваат релативни мерења на поместувањето. [39] [14] [16]

Во практичната примена на *PSInSAR*, дефинирањето на референтна *PS* точка претставува критичен чекор за добивање конзистентни резултати. Најчесто како референтна се избира точката со највисок *Amplitude Stability Index (ASI)* што обезбедува долгорочна фазна стабилност и минимално влијание од локални деформации [36] [63]. Откако ќе се одреди референтната *PS* точка, фазните вредности на сите останати селектирани *PS* точки се диференцираат во однос на неа. На овој начин, секоја релативна интерферометриска фаза може да се претстави како собирок на релативното поместување и релативната грешка на висинската разлика на конкретната *PS* точка во однос на референтната точка, со што се елиминираат апсолутните фазни константи и се обезбедува кохерентна временска серија погодна за понатамошна анализа на деформациите. Релативната интерферометриска фаза ($\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF}$) на секоја од *PS* точките во однос на референтната *PS* точка се изразува со следната релација:

$$\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF} = W\{C_v \cdot B_{t,i} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,i} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n\} \quad (44)$$

Каде:

C_v – Константна вредност на факторот $-\frac{4\pi}{\lambda}$;

Δv – Релативна брзина на поместување на i -тата *PS* точка во однос на референтната;

C_h – Константна вредност на факторот $-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{R \sin \theta}$;

$B_{n,i}$ – Нормален базен вектор на i -тата секундарна аквизиција во однос на референтната;

Δh_{err} – Релативна грешка во надморската висина на i -тата *PS* точка во однос на референтната;

$\Delta\varphi_n$ – Интерферометриски фазен остаток.

Релацијата (44) го претставува изразот за релативна интерферометриска фаза на i -тата *PS* точка во однос на избраната референтна точка. Во овој израз атмосферската компонента е изоставена, бидејќи моделирањето се разгледува на мала површина. Тоа подразбира дека атмосферските фазни компоненти за сите *PS* точки во непосредна близина се идентични или многу слични, така што при пресметувањето на фазните разлики помеѓу i -тата точка и референтната точка, атмосферската фаза практично се елиминира. [36] [57]. Овој пристап овозможува во релативниот модел да доминираат деформациската и топографската резидуална компонента, додека атмосферските варијации не влијаат значајно на резултатот и евентуалните резидуали одат во $\Delta\varphi_n$ компонентата, која претставува интерферометриски фазен остаток.

Релацијата (44) се однесува на една *PS* точка од еден диференцијален интерферограм, формиран преку диференцирање на фазните вредности од i -тата *SAR* снимка во однос на референтната снимка. Доколку анализираме вкупно N *SAR* снимки, тогаш за секоја селектирана *PS*

точка ќе бидат достапни $N-1$ равенки со структура идентична на релацијата (44). Во овие равенки непознати остануваат само релативната брзина на поместување (Δv) и релативната грешка во надморската височина (Δh_{err}), додека коефициентите пред непознатите варираат во зависност од конкретниот интерферограм. Поточно, тие се добиваат како производ на константите (C_v) и (C_h) со варијабилните параметри: временскиот базен вектор ($B_{t,i}$) и нормалниот базен вектор ($B_{n,i}$) за секоја секундарна SAR снимка во однос на референтната снимка. Дополнително, преостанатиот интерферометриски фазен остаток ($\Delta\varphi_n$) не се третира како трета непозната, туку како индикатор за квалитет и конзистентност на моделот.

Со оваа поставеност, локалното просторно - временско моделирање се сведува на решавање на N равенки (при анализирани $N+1$ аквизиции) со 2 непознати (каде може за момент да се изостави $\Delta\varphi_n$ компонентата). Имајќи го предвид изразот од релацијата (19) која покажува дека фазата е експоненцијалниот дел од комплексната репрезентација на повратниот сигнал, може да се воспостави следниот систем на равенки:

$$\begin{cases} e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF})} = e^{j(C_v \cdot B_{t,1} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,1} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \\ e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF})} = e^{j(C_v \cdot B_{t,2} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,2} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \\ \dots \\ e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF})} = e^{j(C_v \cdot B_{t,N} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,N} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \end{cases} \quad (45)$$

Решавањето на системот од равенки би претставувало релативно едноставна геодетска задача доколку фазните вредности не беа модулирани во интервалот $[-\pi; \pi]$. Меѓутоа, присуството на овој ограничувачки оператор ја прави задачата нелинеарна и бара примена на поспецифични методи за проценка на параметрите (v и h_{err})⁸.

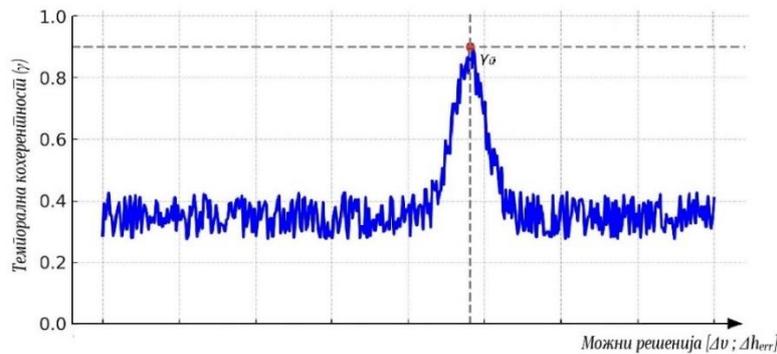
Во оригиналниот труд [36] за *PSInSAR* за решавање на овој проблем предложено е решение со т.н. **максимизација на периодограм**. Во рамките на *PSInSAR* техниката, периодограмот се користи како алатка за спектрална анализа на релативната интерферометриска фаза, која се разгледува во функција од временскиот и нормалниот базен вектор. Со оваа постапка, релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка во надморската височина (h_{err}), се третираат како две фреквенциски димензии во спектралниот домен. Максимизацијата на периодограмот овозможува да се идентификува парот (v , h_{err}) кој генерира најдобра реконструкција на релативната интерферометриска фаза ($\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF}$). Наместо со класични линеарни техники на најмали квадрати, нелинеарниот проблем во *PSInSAR* се решава преку спектрално пребарување. Со други зборови, максимизацијата на периодограмот овозможува по интеративен пат да се идентификува парот (v , h_{err}) при кој собирокот во десната страна на равенките од релацијата (45) најдобро се усогласува со мерената фаза на левата страна, во услови кога резидуалниот шум $|\Delta\varphi_n| < \pi$, [39].

Максимизацијата на периодограмот графички е прикажана на *Слика 53* и се изразува согласно следната релација:

$$\arg \max_{(v; h_{err})} \gamma = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PSREF})} \cdot e^{-j(C_v \cdot B_{t,1} \cdot v + C_h \cdot B_{n,1} \cdot h_{err})} \right| = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j(\Delta\varphi_n)} \right| \quad (46)$$

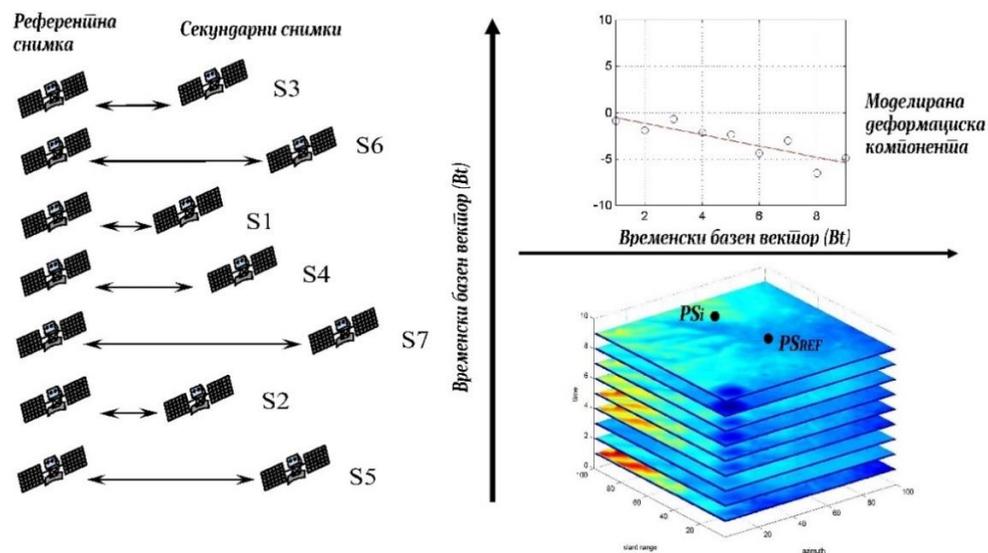
⁸ Во понатамошниот текст, со цел да се постигне еднозначност во означувањето со атмосферското просторно - временско моделирање, релативната брзина на поместување и релативната грешка на надморската висина на i -тата PS точка во однос на референтната, ќе се означуваат пократко со (v) и (h_{err}), наместо со (Δv) и (Δh_{err}).

Како што е прикажано во релацијата (46), преку максимизација на периодограмот се бара онаа комбинација (ν, h_{err}) што овозможува мерената и моделираната фаза да бидат најдобро усогласени во користените N диференцијални интерферограми. Вредноста што се максимизира, означена со γ , претставува нормализирана сума на експоненцијалите од фазните разлики и може да се интерпретира како мерка за степенот на усогласеност помеѓу моделираната и мерената фаза. Токму оваа вредност е позната како **темпорална кохерентност** (*temporal coherence*).



Слика 53 Приказ на дистрибуцијата на можни решенија при максимизацијата на периодограм

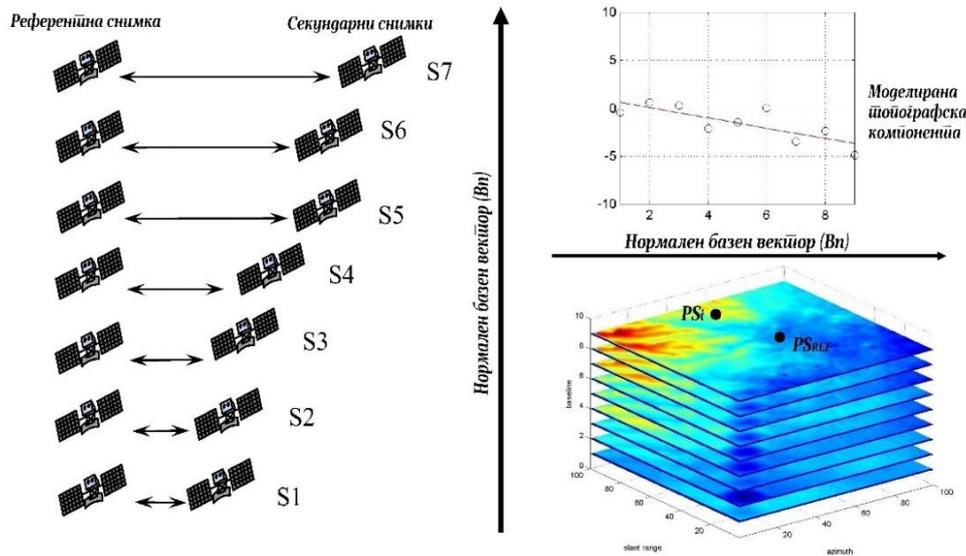
Во контекст на локалното просторно – временско моделирање, **темпоралната кохерентност** претставува мерка за степенот на усогласеност на интерферометриската фаза со избраниот деформациски и топографски модел низ целата временска серија. Темпоралната кохерентност (γ) е ограничена во интервалот $[0 \leq |\gamma| \leq 1]$. Вредноста $\gamma = 1$ теоретски означува совршена усогласеност, односно сите фазни вектори се ориентирани во иста насока и моделот целосно ја реконструира набљудуваната фаза без шум. Вредноста $\gamma = 0$ би значело спротивна ситуација, односно целосна декорелација, кога фазните вектори се случајни и меѓусебно се поништуваат.



Слика 54 Приказ на моделираната деформациска компонента на временскиот базен вектор (модифицирано од [82])

Иако теоретски двете екстремни вредности на темпоралната кохерентност се можни, во реални услови не се јавуваат апсолутни вредности од 0 или 1, туку само нивно асимптотско приближување. Оттука, практичната интерпретација е дека вредности блиски до 1 укажуваат на

добро моделирани топографски и деформациски компоненти, додека вредности блиски до 0 означуваат лошо моделирање или присуство на нелинеарни ефекти и други извори на фазен шум. Моделирањето на деформациската и топографската компонента графички се претставени на Слика 54 и Слика 55.



Слика 55 Приказ на моделираната топографска компонента линеарна на нормалниот базен вектор (модифицирано од [82])

Со максимизирањето на периодограмот за секоја од селектираните PS точки се добива релативната брзина на поместување (v), релативната висинска грешка (h_{err}) на i -тата PS точка во однос на референтната точка. Дополнително како мерило за точност е вредноста на темпоралната кохерентност (γ), која за секоја PS точка ќе има различна вредност. Во пракса, обично PS точките кои имаат $\gamma < 0.5$ се исклучуваат од понатамошните анализи [99]. Со самиот процес на максимизација на периодограмот, добиените резултати не се повеќе модулирани (*wrapped*) фазни вредности, туку демодулирани параметри кои претставуваат добиени резултати за релативната брзина и релативната висинска грешка. На тој начин се избегнува повеќезначноста од $\pm 2\pi$, а добиените (v) и (h_{err}) можат да се користат како физички интерпретабилни величини во понатамошното моделирање.

Одредувањето на релативната брзина на поместување и резидуалната висинска грешка претставува меѓусебно зависен процес, бидејќи неточностите во една од компонентите директно се одразуваат врз проценката на другата, а нивната заедничка оптимизација е предуслов за добивање веродостојни резултати.

Откако ќе се добијат релативната брзина на поместување (v), релативната висинска грешка (h_{err}), може да се пресмета кумулативното поместување на секоја PS точка во однос на референтната PS точка. Со оглед на веќе дефинираниот линеарен модел, кумулативното поместување се добива како производ на релативната брзина на поместување со временскиот базен вектор (B_t). На тој начин, за секоја епоха се добива акумулирана вредност на поместување во однос на почетната состојба. Паралелно, добиената вредност за релативната висинска грешка (h_{err}) овозможува корекција на дигиталниот елевациски модел. Со комбинирање на овие информации, за секоја PS точка се добива временска серија на прецизни поместувања, истовремено коригирана за грешките во ДЕМ.

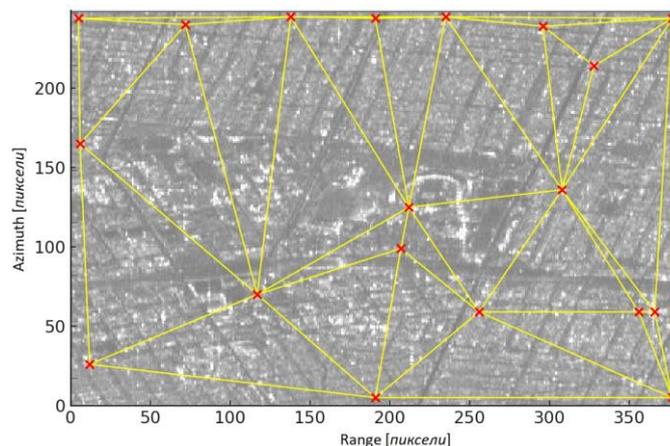
3.5.6 Атмосферско (APS) просторно – временско моделирање

Локалното просторно–временско моделирање претставува ефикасен пристап за линеарно определување на компонентите од интерес, но неговата примена е ограничена на релативно мали површини (до приближно 1 km^2). Доколку истиот принцип се примени на поголеми области, се јавува забележливо просторно корелирано намалување на темпоралната кохерентност, особено кај PS точките што се наоѓаат на поголемо растојание во однос на референтната точка. Тоа е индикација за присуство на атмосферската компонента во интерферометрискиот фазен остаток ($\Delta\varphi_n$) од релација (46). [36] [99] [94]

За да се надмине ова ограничување, пред примената на алгоритмот на локалното просторно–временско моделирање неопходно е воведување на поинаков пристап. Тој опфаќа експлицитно моделирање на атмосферската компонента и нејзина просторна интерполација преку мрежа од PS кандидати и конструирање на т.н. *атмосферски фазен прозорец (Atmospheric Phase Screen – APS)* за секоја од SAR аквизициите, кој ја претставува проценетата атмосферска фаза за целото подрачје. Поради просторната корелација на атмосферската компонента, добиените PS треба да покажуваат хомогена просторна распределба, без нагли скокови на фазата помеѓу соседни пиксели. На тој начин APS ја содржи информацијата за атмосферската фазна компонента во сите пиксели на анализираната површина и за сите аквизиции, а потоа се отстранува од фазните вредности на PS точките, кои служат како влез за локалното просторно–временско моделирање [36] [39].

Алгоритмот на атмосферското просторно–временско моделирање започнува со селекција на PS кандидати. Тие претставуваат подмножество на PS точки со највисоки вредности на индексот на амплитудна стабилност и се сметаат за најсигурни репери за понатамошна анализа. Селекцијата на овие точки е условена од два клучни фактори:

1. Обезбедување на највисок можен индекс на амплитудна стабилност, што гарантира минимална фазна варијабилност низ времето и
2. Правилна и доволно густа просторна распределба низ анализираната површина, со цел да се обезбеди соодветна мрежа за моделирање на атмосферската компонента (Слика 56) [99].



Слика 56 Мрежа од PS кандидати

Најчесто користен пристап за воспоставување на мрежата од PS кандидати и нивно меѓусебно поврзување е *Delaunay* триангулацијата [97]. Овој метод овозможува стабилни и добро дефинирани

конекции меѓу соседните PS кандидати, формирајќи мрежа од триаголници, што во голема мера наликува на класичните геодетски триангулациски мрежи. Ваквиот принцип на поврзување е илустриран на Слика 56.

Воспоставената мрежа од PS кандидати претставува основа за проценка на атмосферската компонента. Главната идеја на просторно – временско моделирање на атмосферата се заснова на фактот дека интерферометриските фазните разлики долж конекциите меѓу соседните PS кандидати се речиси ослободени од атмосферските влијанија поради просторната корелација на оваа компонента. На тој начин, интерферометриските фазни разлики определени помеѓу соседните пиксели може да се употребат за прецизно моделирање на деформациската и топографската резидуална релативна компонента помеѓу поврзаните точки [36] [39]. Слично на системот равенки од релацијата (45) и тука се формира систем на равенки, при што секоја равенка на поправка се однесува на секоја интерферометриската фазна разлика помеѓу двете точки кои ја сочинуваат конекцијата. Со тоа се формира систем на равенки согласно следнава релација:

$$\begin{aligned} e^{j(\Delta\varphi_{PSCa}^{PSCb})} &= e^{j(C_v \cdot B_{t,1} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,1} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \\ e^{j(\Delta\varphi_{PSCc}^{PSCc})} &= e^{j(C_v \cdot B_{t,2} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,2} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \\ &\dots \\ e^{j(\Delta\varphi_{PSCm}^{PSCn})} &= e^{j(C_v \cdot B_{t,N} \cdot \Delta v + C_h \cdot B_{n,N} \cdot \Delta h_{err} + \Delta\varphi_n)} \end{aligned} \quad (47)$$

Во релацијата (47), PSC означува PS кандидати, додека со индексите (a, b, c, \dots, m, n) се означуваат различните PS кандидати. Потоа, со примена на принципот на максимизирање на периодограмот се добиваат релативната брзина (Δv) и релативната висинска грешка (Δh_{err}) помеѓу точките од секоја конекција. И притоа слично на релацијата (46) за секоја конекција се пресметува темпоралната кохерентност.

Во [39] е истакнато дека вака добиените релативна брзина на поместување и релативна висинска грешка се фазно демодулирани вредности, што е овозможено преку користење на фазните разлики меѓу блиските PSC парови. Поради тоа, задачата за интегрирање на овие вредности и добивање на релативната брзина (v) и релативната висинска грешка (h_{err}) на секој PS кандидат во однос на избрана референтна точка⁹, математички се поедноставува. На овој начин проблемот се сведува на решавање на наддетерминиран систем на равенки, при што најсоодветен е *методот на најмали квадрати*, широко применуван во геодетската наука за процена на параметри врз основа на редундантни набљудувања. Основниот матричен запис е прикажан со следнава релација:

$$[V]_{(N_{conn} \times 1)} = [A]_{(N_{conn} \times N_{PSC})} \cdot [x]_{(N_{PSC} \times 1)} + [f]_{(N_{conn} \times 1)} \quad (48)$$

Каде:

$[V]_{(N_{conn} \times 1)}$ – Матрица на поправки, составена од N_{conn} (број на конекции) редици и една колона;

$[A]_{(N_{conn} \times N_{PSC})}$ – Матрица на коефициенти, составена од N_{conn} редици и N_{PSC} колони;

$[x]_{(N_{PSC} \times 1)}$ – Матрица на непознати, составена од N_{PSC} редици и една колона;

⁹ Заради еднозначност и континуитет во означувањето со Δ пред (v) и (h_{err}) се означува релативното поместување и надморска грешка помеѓу PS кандидатите кои ги сочинуваат конекциите, а без Δ се означуваат релативните поместувања и надморска грешка на i -тиот PS кандидат во однос на референтната точка.

$[f]_{(N_{conn} \times 1)}$ – Матрица на слободни членови, составена од N_{conn} редици и една колона.

Во релацијата (48) прикажан е матричниот запис на системот на равенки на поправките. Бидејќи интерферометриската фаза истовремено зависи од релативната брзина на поместување (v) и од релативната висинска грешка (h_{err}) на i -тиот PS кандидат во однос на референтната точка, матриците треба да се однесуваат на двете компоненти [39], па заради тоа, попрецизната матрична конотација е изразена согласно следната релација:

$$\begin{bmatrix} V_v \\ V_{h_{err}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\Delta v} \\ x_{\Delta h_{err}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{\Delta v} \\ f_{\Delta h_{err}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Со оглед на тоа што фазните разлики се релативни величини, системот по своја природа е сингуларен и не овозможува определување на апсолутни вредности за параметрите. Поради ова, во матриците се додава уште една редица што се однесува на избраната референтна точка, со што нејзината релативна брзина и висинска грешка се фиксираат на нула. На овој начин системот добива единствено решение, а сите останати параметри се изразуваат во однос на таа референтна точка.

Матрицата на непознатите се добива како производ од инверзната матрица на нормалните равенки и вектор-матрицата на познатите членови. Експлицитно, израмнетите вредности за релативната брзина и релативната висинска грешка се пресметуваат според следната матрична релација:

$$\begin{aligned} [x_v]_{(N_{PSC} \times 1)} &= ([A]^T \cdot [P] \cdot [A])^{-1} \cdot ([A]^T \cdot [P] \cdot [f_{\Delta v}]) \\ [x_{h_{err}}]_{(N_{PSC} \times 1)} &= ([A]^T \cdot [P] \cdot [A])^{-1} \cdot ([A]^T \cdot [P] \cdot [f_{\Delta h_{err}}]) \end{aligned} \quad (50)$$

Каде:

$[P]$ – Дијагонална квадратна тежинска матрица, сочинета од темпоралната кохерентност за секоја конекција добиена со максимизацијата на периодограмот помеѓу конекциите;

Матриците на непознати $[x_v]$ и $[x_{h_{err}}]$ од матричните равенки претставени со релацијата (50) претставуваат интегрирани вредности за релативните поместувања и релативните висински грешки на секоја од PS кандидатите во однос на избраната референтна точка.

Примената на интегрираните вредности за релативната брзина (v) и од релативната висинска грешка (h_{err}) во понатамошната анализа е директно зависна од квалитетот на мрежата на PS кандидати. Заради тоа геометријата на мрежата (претставена на Слика 56) е од особена важност, бидејќи таа мора да биде доволно густа и правилно распоредена за да се избегнат празнини (‘дупки’) кои би довеле до локални нестабилности во интеграцијата [99].

Со решавањето на системот на равенки на поправки од мрежата на PS кандидати, согласно матричните равенки од релацијата (50), за секоја од овие точки се добиваат релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}), кои беа непознати вредности за определување на деформациската (φ_{disp}) и топографската компонента (φ_{topo}^{res}) од релацијата (43). Сепак, ова не претставува крајна цел на атмосферското просторно-временско моделирање, чиј главен фокус е определувањето на атмосферскиот фазен прозорец (APS). За таа цел, потребно е за секоја од PS кандидатите да се процени атмосферската компонента, која доколку е просторно корелирана, се интерполира низ целата површина, за секоја аквизиција посебно.

По добивањето на релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}) за секој PS кандидат, со релацијата (47) за секој PS пар, лесно може да се пресмета фазниот остатокок ($\Delta\varphi_{conn_{res}}$), чиј експоненцијален дел може да се изрази со релација:

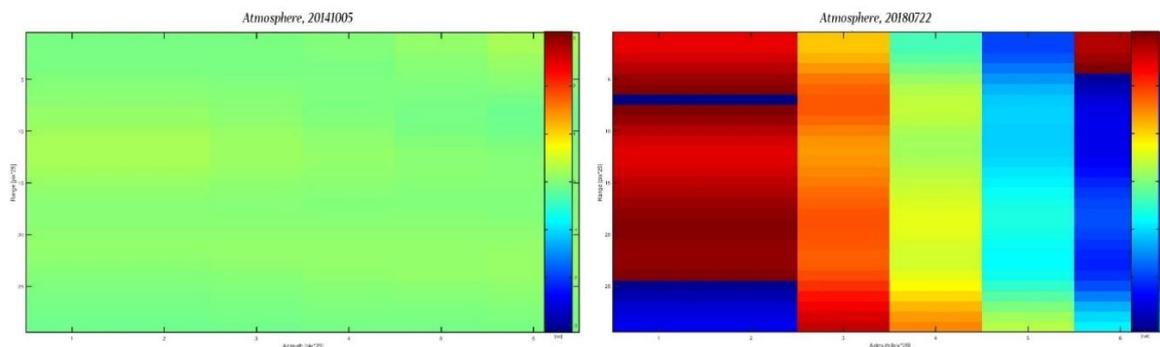
$$\Delta\varphi_{conn_{res}} = \Delta\varphi_{conn} - \Delta\varphi_{conn_{disp}} - \Delta\varphi_{conn_{topo}^{res}} = \Delta\varphi_{conn_{atmo}} + \Delta\varphi_{conn_{NL_{disp}}} + \Delta\varphi_{conn_{noise}} \quad (51)$$

Имајќи ја предвид релацијата (43) лесно може да се заклучи дека фазниот остатокок ($\Delta\varphi_{conn_{res}}$) од релација (51) ја содржи преостанатата информација за атмосферската компонента ($\Delta\varphi_{conn_{atmo}}$), како и евентуални нелинеарни поместувања ($\Delta\varphi_{conn_{NL_{disp}}}$) и разликата во нивните фазни шумови ($\Delta\varphi_{conn_{noise}}$). За да се поедностави алгоритмот, ќе претпоставиме дека главниот дел од остатококот се должи на атмосферската компонента, што на крајот може да се провери со тестирање на добиените резултати од APS [97]. Според [39], оваа претпоставка е оправдана бидејќи варијансата на фазниот остатокок може да се изрази како збир од трите независни чинители и тоа од 3 причини. Прво, PS кандидатите се селектирани на локации со висок индекс на амплитудна стабилност, па нивниот декорелациски шум (σ_{noise}^2) е минимален. Второ, бидејќи PS кандидатите се во непосредна близина, па атмосферската компонента е силно просторно корелирана и нејзината варијанса (σ_{atmo}^2) е мала (за растојанија < 1 km, типични се вредности под 0.1 [118]). И трето, движењата на соседните пиксели обично се корелирани, што го намалува и придонесот на нелинеарните поместувања ($\sigma_{NL_{disp}}^2$). Секако, алгоритмот на крајот предвидува и тестирање на оваа хипотеза, при што добиените резултати од APS овозможуваат да се провери дали навистина главниот дел од фазниот остатокок се должи на атмосферската компонента, или пак е потребно дополнително моделирање на нелинеарните поместувања и фазниот шум.

Доколку инверзијата од релација (50) е стабилна и поместувањата се линеарни, вредностите на фазниот остатокок се релативно мали и погодни за употреба во понатамошно моделирање. Во таков случај, за секој PS кандидат може со примена на методот на најмали квадрати да се процени атмосферската компонента, на сличен начин како што претходно беа определени релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}) [99] [97]. Така, за секоја аквизиција се добива проценета атмосферската компонента за сите PS кандидати, согласно следнава матрична релација:

$$[x_{atmo}]_{(N_{PSC} \times 1)} = ([A]^T \cdot [P] \cdot [A])^{-1} \cdot ([A]^T \cdot [P] \cdot [f_{\Delta\varphi_{conn_{res}}}]) \quad (52)$$

Со примена на релацијата (52) се добиваат проценетите вредности на атмосферската компонента за секој од PS кандидатите. Врз основа на овие резултати, со примена на интeрфолациски мeтoди може да се изгради **атмосферскиот фазен пророзец (APS)** за секоја аквизиција посебно (Слика 57).



Слика 57 Споредба на два APS од две аквизиции: 05.10.2014 (лево) и 22.07.2018 (десно)

На Слика 57 се прикажани два атмосферски фазни прозорци (*APS*) за иста површина, но за различни аквизиции. *APS* определен за аквизицијата од 05.10.2014 (лево) покажува релативно хомогена просторна распределба на атмосферската фазна компонента, што укажува на добро моделирана атмосфера без значајни просторни варијации. Наспроти тоа, *APS* за аквизицијата од 22.07.2018 (десно) се одликува со нагли и големи промени во просторниот распоред на атмосферската фаза, што укажува на силни атмосферски влијанија или на недоволно прецизно моделирана атмосферска компонента за таа аквизиција. Ваквите разлики го потврдуваат фактот дека атмосферската компонента е силно варијабилна во времето и дека нејзиното моделирање мора да се изведува одделно за секоја аквизиција.

Визуелната интерпретација на *APS* за секоја аквизиција претставува првична проверка на успешноста на моделирањето на атмосферската компонента, но индиректно и на останатите компоненти што ја сочинуваат интерферометриската фаза. Имено, доколку една од овие компоненти не е соодветно моделирана, тоа неминовно ќе се одрази врз квалитетот на останатите. Во софтверот *SARPROZ*, покрај визуелната проценка, постои можност и за прецизно математичко тестирање на успешноста на моделирањето на *APS* за секоја аквизиција, како и на проценетите параметри за релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}) [97] [99]. За таа цел, кај секој од *PS* кандидатите за секоја аквизиција, во релацијата (43) се заменуваат моделираните параметри: релативната брзина на поместување (v), релативната грешка на надморската висина (h_{err}) и проценатата атмосферска компонента и истите се одземаат од мерената интерферометриска фаза. На тој начин, за секој *PS* кандидат при секоја аквизиција се добива резидуалната фаза, која експлицитно може да се изрази преку следнава релација:

$$\varphi_{PSC_{res}} = \varphi_{PSC_i} - \varphi_{PSC_{disp}} - \varphi_{PSC_{topo}^{res}} - \varphi_{PSC_{atmo}} \quad (53)$$

Вака пресметаните фазни резидуали може да се организираат во матричен облик, подредени по секој *PS* кандидат и по секоја аквизиција [99] [97]. Нивната распределба може јасно да се прикаже преку матричниот запис даден со релацијата (54):

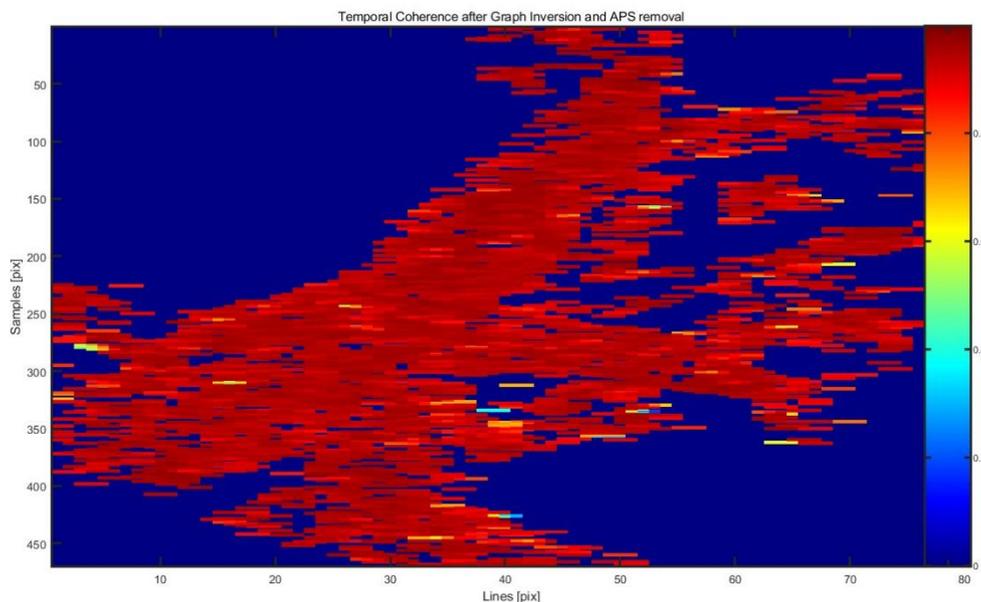
$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccc}
 & \text{Img}_1 & \text{Img}_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \text{Img}_N \\
 \text{PSC}_1 & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \\
 \text{PSC}_2 & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \text{PSC}_N & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \begin{array}{|c} \hline \cdot \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \left. \frac{1}{N_{img}} \sum_{l=1}^N e^{j \varphi_{PSC1}^{res}} \right| \\
 \left. \frac{1}{N_{img}} \sum_{l=1}^N e^{j \varphi_{PSC2}^{res}} \right| \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \left. \frac{1}{N_{img}} \sum_{l=1}^N e^{j \varphi_{PSCN}^{res}} \right|
 \end{array}
 \quad (54)$$

$$\begin{array}{c}
 \left. \frac{1}{N_{psc}} \sum_{k=1}^N e^{j \varphi_{img1}^{psc}} \right| \\
 \left. \frac{1}{N_{psc}} \sum_{k=1}^N e^{j \varphi_{img2}^{psc}} \right| \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \left. \frac{1}{N_{psc}} \sum_{k=1}^N e^{j \varphi_{imgN}^{psc}} \right|
 \end{array}$$

Секоја редица од матричниот запис од релацијата (54) се однесува на секој PS кандидат, додека секоја колона кореспондира на одделна аквизиција. Врз основа на ваквата организација, за секој PS кандидат може да се пресмета **просечната темпорална кохерентност**, согласно релација (55):

$$\gamma_{avg}(PSC_k) = \frac{1}{N_{Img}} \left| \sum_{i=1}^{N_{Img}} e^{j \phi_{PSC_k}^{res}} \right| \quad (55)$$

Просечната темпоралната кохерентност (γ_{avg}) дефинирана со релацијата (55) се пресметува како средна вредност на резидуалните фази долж секоја редица од матричниот запис, односно за поединечен PS кандидат разгледан низ сите аквизиции. Таа не е целосно идентична со стандардната темпорална кохерентност добиена преку максимизирање на периодограмот дефинирана со релацијата (46), но во практичната примена нивните вредности најчесто се многу блиски. Во *SARPROZ* софтверот просечната темпорална кохерентност е наречена **темпорална кохерентност после инверзијата**, бидејќи се пресметува по извршената инверзија и определувањето на APS .



Слика 58 Приказ на просечната темпорална кохерентност од *SARPROZ* софтверот

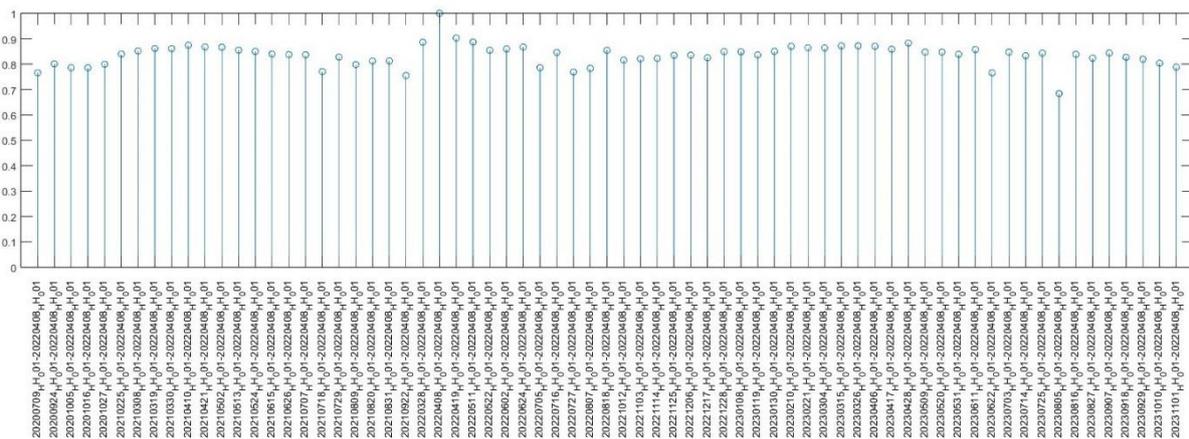
На Слика 58 е прикажана просторната распределба на просечната темпорална кохерентност за секој од PS кандидатите што се користени при определувањето на APS во проектот за определување на деформации на урбаната зона на Скопската Котлина. Оваа мапа претставува индикатор за стабилноста и квалитетот на избраните PS кандидати, бидејќи повисоките вредности на темпорална кохерентност (обележани со црвена боја) упатуваат на доследно и сигурно однесување на фазата низ сите аквизиции, додека пониските вредности сигнализираат точки со потенцијално поголемо влијание од шум или атмосферски варијации. На тој начин, мапата служи како основен инструмент за проценка на веродостојноста на PS кандидатите и нивната погодност за понатамошно просторно-временско моделирање.

Концептот на темпорална кохерентност, кој вообичаено се пресметува поединечно за секој PS кандидат, може да се прошири и на ниво на аквизиција. Во овој случај не се оценува стабилноста на една точка низ сите времески епохи, туку се разгледува квалитетот на самата аквизиција преку сите избрани PS кандидати. Практично, ова претставува пресметка на средната вредност на

резидуалните фази долж секоја од колоните на матричниот запис, односно за една аквизиција разгледана преку сите PS кандидати. Така се добива индикатор за тоа колку е конзистентна дадената снимка во просторот, што овозможува навремено препознавање на аквизиции погодени од силни атмосферски нарушувања или зголемен шум и нивно внимателно третирање или отстранување во понатамошната анализа. Овој показател може експлицитно да се изрази со следната релација:

$$\gamma_{avg}(Img_m) = \frac{1}{N_{PSC}} \left| \sum_{i=1}^{N_{PSC}} e^{j \phi_{Img_m}^{res}} \right| \quad (56)$$

На *Слика 59* е прикажана просечната просторна кохерентност по аквизиција, пресметана според релацијата (56). Секој столб ја претставува вредноста на овој показател за поединечна SAR снимка, добиена како средна вредност на резидуалните фази преку сите PS кандидати. Воочливо е дека најголемиот дел од аквизициите имаат висока кохерентност (над 0.75), што укажува на добра конзистентност во простор и со тоа на висока доверливост на податоците. Сепак, постојат и неколку аквизии со пониски или поизразено варијабилни вредности, кои веројатно се резултат на засилени атмосферски нарушувања или зголемено присуство на шум. Овој показател овозможува навремена идентификација на аквизиции со пониска стабилност и нивно внимателно третирање или исклучување при понатамошната анализа.



Слика 59 Графички приказ на просечна просторна кохерентност за секоја аквизиција (SAPRORZ софтвер)

Доколку резултатите од тестирањето ги оправдаат очекувањата, како што е прикажано преку графичките прикази на *Слика 58* и *Слика 59*, може да се заклучи дека атмосферското просторно-временско моделирање е успешно и дека определените APS за секоја аквизиција можат сигурно да се елиминираат од интерферометриските снимки. Со тоа, вториот дел од $PSInSAR$ анализата се сведува на примената на алгоритмот за локално просторно-временско моделирање, кој овозможува употреба на поголем број PS точки. Ова се постигнува преку намалување на прагот на индексот на амплитудна стабилност или преку примена на алтернативни критериуми за селекција на стабилни расејувачи.

Поделбата на просторно-временското моделирање на „атмосферско“ и „локално“ во оваа разработка е направена исклучиво заради полесно и појасно изнесување на теоретските основи на $PSInSAR$ алгоритмот. Во оригиналниот пристап презентирани во [36], [39] и понатаму развиван и надградуван во [63], [57], [16] и многу други, алгоритмот не се разгледува во вакви сегменти, туку се применува како интегрирана целина. Идејата за ваква поделба е инкорпорирана и во софтверот

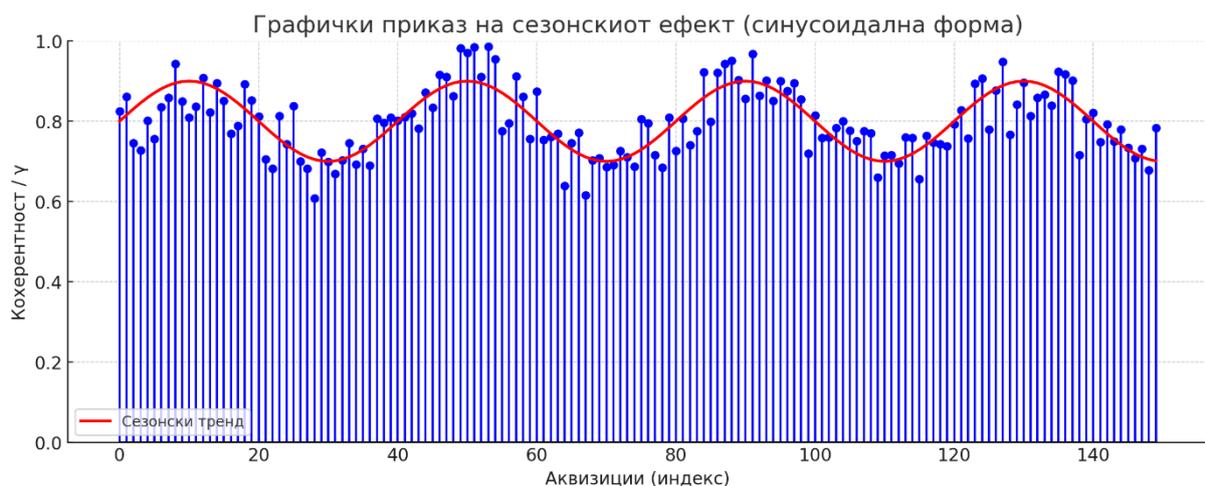
SARPROZ, кој нуди посебни модули за различни типови на анализа. За помали површини се применува директно локалното просторно-временско моделирање, без претходно определување на атмосферската компонента. За поголеми површини, пак, најнапред се проценува и тестира атмосферскиот фазен прозорец (APS), а потоа анализата се проширува кон поголем број PS точки. Со ова се обезбедува интегриран пристап кој ја комбинира корекцијата на атмосферските ефекти со подобрување на стабилноста и густината на конечната мрежа од стабилни расејувачи.

3.5.7 Моделирање на сезонски ефект преку температурната компонента

Во рамките на интерферометриската анализа, деформациската компонента вообичаено се моделира под претпоставка дека таа е линеарна функција во времето. Овој пристап овозможува аналитичка едноставност и претставува основа за понатамошно моделирање, но истовремено носи одредени ограничувања. Релацијата (42) ја претставува токму оваа поставеност, при што деформациската фазна компонента е дефинирана како линеарна функција на времето. Во суштина, ваквиот модел подразбира константна стапка на поместување, односно промена на позицијата на набљудуваната точка во однос на референтната точка, што следи праволиниска зависност со текот на времето, без да се земат предвид можни осцилации или нелинеарни варијации.

Сепак, во реални услови оваа претпоставка не секогаш е соодветна. Особено во урбани или густо населени средини, каде сигналот има интеракција со високи објекти, мостови и слично кои имаат способност за акумулација и ослободување на термална енергија (како бетон, асфалт или покривни конструкции), се јавува феноменот познат како **сезонски ефект**. Тој се манифестира преку периодични варијации во фазата, поврзани со сезонските промени на температурата или локалните атмосферски услови.

Првата индикација за присуство на вакви ефекти најчесто може да се забележи во приказот на просечната просторна кохерентност за секоја аквизиција, каде појавата на систематски осцилации во вредностите на кохерентноста на секоја аквизиција укажува на потенцијално присуство на сезонска компонента во фазните мерења.



Слика 60 Приказ на просечна просторна кохерентност за секоја аквизиција со присуство на сезонски ефект

На Слика 60 се прикажани варијации на просечната просторна кохерентност за секоја аквизиција, каде јасно може да се забележи карактеристичниот сезонски ефект (нацртан со црвена

синусоидна линија). Иако деформациската компонента со релацијата (42) е претходно моделирана како линеарна функција во времето, овој поедноставен пристап не ја опфаќа целосно реалната динамика на фазата. Поради тоа, во резултатите се појавуваат периодични осцилации со приближно синусоидална форма. Вакви отстапувања можат да бидат предизвикани од различни фактори, како што се локални промени на влажноста, воздушен притисок и слично, но најчест и најизразен причинител се *температурните варијации*. Тие директно влијаат врз физичките својства на објектите, преку т.н. *термичка експанзија* и *термичка контракција* и врз диелектричните карактеристики на материјалите, што резултира со промена на фазната вредност и на стабилноста на сигналот.

Вообичаено, ваквите сезонски варијации најјасно се манифестираат преку разликите меѓу летните и зимските периоди. Зимските месеци се карактеризираат со повисока просторна кохерентност, што произлегува од постабилната атмосфера, порамномерните температурни градиенти и редуцирано влијание на вегетацијата. Наспроти тоа, во летните месеци, поинтензивните температурни осцилации, акумулацијата и ослободувањето на топлина од урбаните површини, како и појавата на конвективни струења во атмосферата, доведуваат до пониски вредности на кохерентноста.

За да се обезбеди овие сезонски разлики да бидат прикажани на конзистентен начин, повеќето SAR сателитски мисии во далечинска детекција се проектирани да орбитираат во сончево-синхронизирани орбити. Тоа подразбира дека сите последователни аквизиции на дадена површина се изведуваат во *идентично локално време*. Со ваквиот дизајн не се елиминира сезонската компонента, туку напротив, таа доаѓа појасно до израз, бидејќи се избегнува мешањето со дневните варијации на температурата. На тој начин, добиените временски серии овозможуваат пообјективна анализа на сезонските осцилации и нивно издвојување како посебна компонента при интерферометриското моделирање.

Сезонскиот ефект може да се моделира со користење на регистрирани податоци за температурите, при што фазните варијации поврзани со термалната експанзија на материјалите се разгледуваат како дополнителна компонента во интерферометрскиот модел, согласно следнава релација:

$$\varphi_{disp_{thermal}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\alpha \cdot T_i \quad (57)$$

Каде:

$\Delta\alpha$ – Ефективен термален коефициент на експанзија изразен ($mm/^\circ C$);

T_i – Регистрирана температура во i -тата аквизиција.

Со релацијата (57) сезонската компонента се моделира како фазна варијација која настанува како последица од промена на температурата за еден целзиусов степен. Таа може директно да се инкорпорира во системот на равенки дефиниран од релацијата (45), каде интерферометриската фаза се изедначува со најдобро моделираната комбинација од релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}), добиени со максимизирање на периодограмот. Вклучувањето на дополнителната непозната, односно на сезонскиот ефект, овозможува интерферометриската фаза покрај претходно споменатите две непознати, да се опише и во функција на регистрираните температури за секоја аквизиција. На овој начин, термалната експанзија се третира како независна непозната која, заедно со релативната брзина на

поместување и релативната грешка на надморската висина, се проценува преку максимизирање на просторен периодограм.

На **Слика 61** е прикажан истиот случај како на **Слика 60**, но овој пат при просторно-временското моделирање е земен предвид и елиминиран сезонскиот ефект. Вклучувањето на сезонската компонента овозможува фазните осцилации предизвикани од термалните варијации да се редуцираат, при што временската серија добива значително постабилен карактер. На тој начин, кохерентноста покажува поголема конзистентност низ сите аквизиции, што претставува јасна потврда дека третирањето на сезонските ефекти е неопходен услов за прецизна интерферометриска анализа. Овој аспект е особено важен во урбаните средини, каде високите згради и големи мостови, се силно подложни на температурни варијации. Во текот на летните месеци тие се шират, а во зимските периоди се собираат.

Овие циклични поместувања се јасно забележливи во фазните мерења, но обично не резултираат со трајни или долгорочни структурни деформации на објектите. Сепак, доколку не се моделираат соодветно, можат да предизвикаат погрешна интерпретација на стабилноста на објектите и да доведат до неточна проценка на вистинските трендови на поместување.



Слика 61 Приказ на просечна просторна кохерентност за секоја аквизиција со елиминиран сезонски ефект

3.5.8 Моделирање на нелинеарни поместувања

Традиционалниот *PSInSAR* пристап почива на претпоставката дека деформацијата може да се опише со линеарна брзина на поместување, изразена со релација (42). Овој модел е доволно ефикасен во голем број случаи, но понекогаш покажува ограничувања при анализа на тектонски движења, свлечишта, земјотреси и слични феномени. Во вакви ситуации, линеарниот модел не успева да ја опфати реалната динамика на движењата, што резултира со намалување на темпоралната кохерентност во релациите (46) и (55).

Нелинеарните трендови можат да се манифестираат како забрзувања, повеќесегментни линеарни трендови, ненадејни скокови (на пр. при активирање на клизиште или земјотрес) или комбинација од повеќе механизми. За да се опфатат овие сценарија, *PSInSAR* може да се прошири со нелинеарни модели, како што се полиномијални апроксимации или сегментирани временски серии на поместувања [95].

Поради тоа, релацијата (42) за линеарниот тренд на поместувањата, теоретски може да се модифицира со примена на полиномијална апроксимација, согласно следнава релација:

$$\varphi_{disp_{PS_i}} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{t,i} \cdot v + B_{t,i} \cdot \Delta a \quad (58)$$

Каде:

Δa – Релативно забрзување на i -тата PS точка во однос на референтната точка.

Во практична примена, нелинеарната анализа се заснова на независна проценка на брзината на поместување (v) и релативната грешка на надморската висина (h_{err}), користејќи сегментиран пристап. Во таа насока, нелинеарната варијанта на $PSInSAR$, најпрво започнува со проценка на релативната грешка на надморската висина (h_{err}) [95] [2], која се смета за константна низ сите аквизиции, согласно следнава релација:

$$\arg \max_{(h_{err})} = \left\{ \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PS_{REF}} - C_h \cdot B_n \cdot h_{err})} \right| \right\} = \left\{ \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PS_{REF}} - \frac{4\pi}{\lambda \cdot R \cdot \sin \theta} \cdot B_n \cdot h_{err})} \right| \right\} \quad (59)$$

Каде:

N – Број на диференцијални интерферограми;

$B_{n,1}$ – Нормален базен вектор;

C_h – Константна вредност на факторот $\frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{R \sin \theta}$.

Сегментираниот пристапот користи „подвижни“ прозорци составени од ограничен, непарен број последователни диференцијални интерферограми (на пример 11, 13, 15 или 19). Така, прозорец од 11 интерферограми опфаќа пет пред и пет по централниот интерферограм. Наместо глобално минимизирање на резидуалната фаза преку линеарен модел, со овој метод се добиваат локални проценки на параметрите за секој прозорец. Потоа, овие локални вредности се интегрираат за да се изгради кумулативната временска серија на поместувања за целиот анализиран период [2]. Брзината на поместување (v) на секој сегмент се проценува согласно следната релација:

$$\arg \max_{(v)} = \left\{ \frac{1}{n_s} \left| \sum_{i=1}^{n_s} e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PS_{REF}} - C_v \cdot B_t \cdot v)} \right| \right\} = \left\{ \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^{n_s} e^{j(\Delta\varphi_{PS_i}^{PS_{REF}} - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot B_t \cdot v)} \right| \right\} \quad (60)$$

Каде:

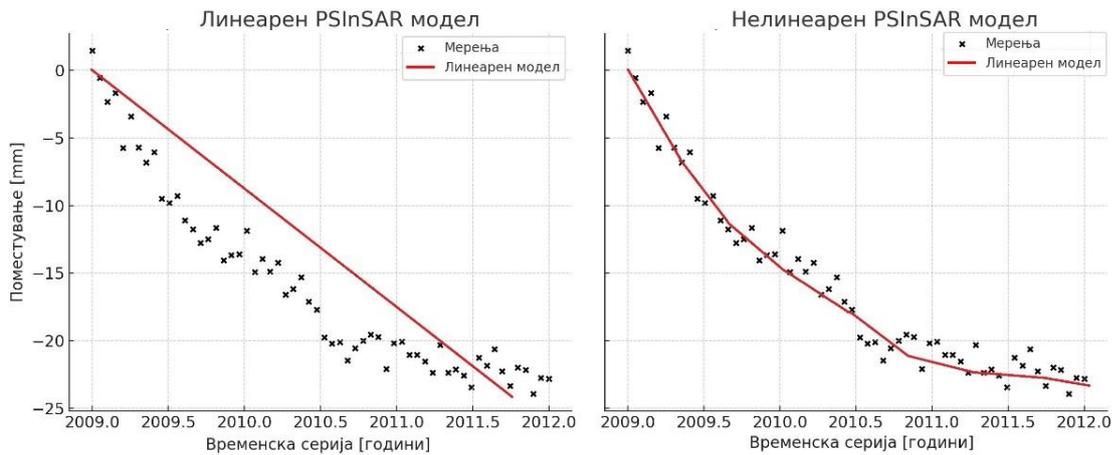
n_s – Број на диференцијални интерферограми во подвижниот прозорец;

$B_{t,1}$ – Временски базен вектор;

C_v – Константна вредност на факторот $\frac{4\pi}{\lambda}$.

На Слика 62 е дадена илустрација на разликата помеѓу линеарниот и нелинеарниот $PSInSAR$ модел. Левиот приказ го претставува класичниот линеарен пристап, каде поместувањата се опишуваат со константна брзина низ целиот период, што резултира со послабо усогласување со мерените податоци. Десниот приказ го претставува нелинеарниот модел, кој преку сегментиран пристап успева да ги следи забрзувањата и промените во динамиката на движењата, при што добиената крива многу подобро ја отсликува реалната временска серија. Ова нагласува дека

нелинеарниот пристап обезбедува попрецизно моделирање на комплексни деформациски процеси.



Слика 62 Приказ на линеарен и нелинеарен модел на поместување

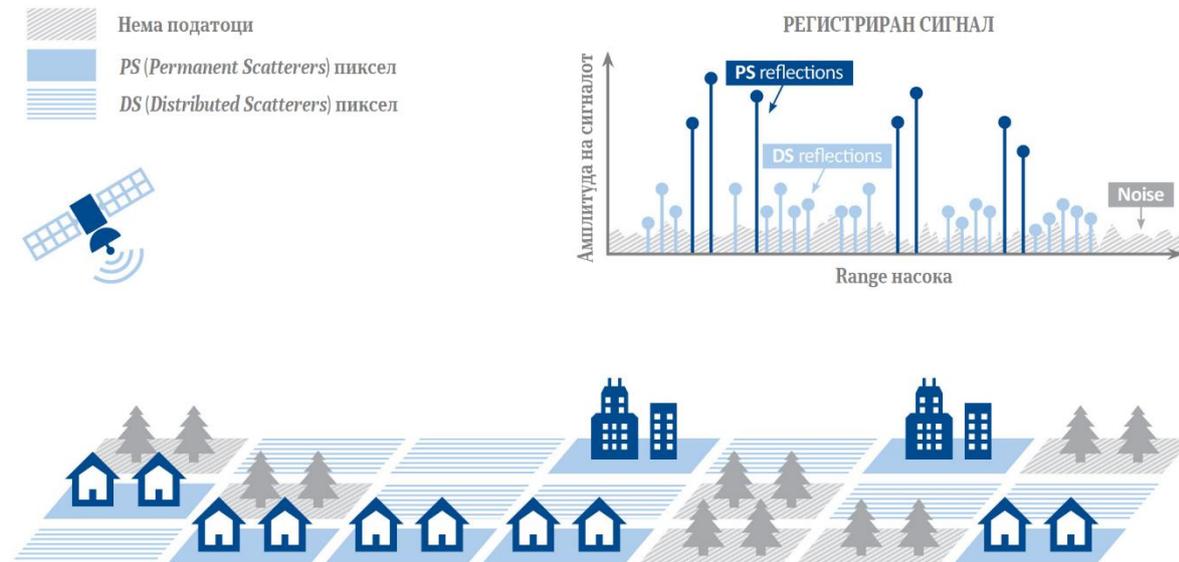
Кога предмет на анализа се нелинеарни трендови на поместување, класичните мапи на брзина на поместување ја губат својата информативна вредност, бидејќи претставуваат константен тренд низ целото време на набљудување. Наместо тоа, многу поинформативни се кумулативните мапи на поместување, кои ја прикажуваат вкупната промена на положбата на секоја *PS* точка од почетокот до крајот на анализираниот интервал. Ваквиот пристап овозможува појасна и физички пореална интерпретација на целокупниот ефект од процесите што се одвивале, без разлика дали станува збор за постепени деформации, повеќесегментни трендови или ненадејни скокови предизвикани од тектонски активности, свлечишта или човечки интервенции.

И покрај предностите на овој пристап, постои одреден ризик бидејќи релативната грешка на надморската висина (h_{err}) и релативната брзина на поместување (v) не се проценуваат заедно, туку во одвоени чекори. Ова може да резултира со погрешна или нестабилна проценка на параметрите, особено во области со пониска кохерентност. Затоа во практиката обично се применуваат и линеарна и нелинеарна анализа, а во фазата на постобработка се споредуваат резултатите и се следи и трендот и темпоралната кохерентност на двете проценки за секоја *PS* точка. На тој начин се намалува веројатноста за погрешна интерпретација и се обезбедува поконзистентна проценка на деформациските процеси [99] [97].

3.6 МОДЕЛИРАЊЕ НА *INSAR* ВРЕМЕНСКИ СЕРИИ СО ДИСТРИБУИРАНИ РАСЕЈУВАЧИ (*DS*)

PSInSAR техниката, детално објаснета во претходното поглавје, недвосмислено претставува моќна и сигурна алатка за определување на деформации со висока точност. Главното ограничување на оваа техника е нејзината зависност од присуството на доволен број кохерентни и стабилни цели, односно *PS* точки. Вон урбаните подрачја, како што се региони со густа вегетација, пустински или ерозивни предели, бројот на *PS* може значително да се намали на само неколку точки по квадратен километар. Ваквата ситуација води до недоволна просторна покриеност и ограничени можности за примена на оваа техника.

За надминување на овие ограничувања е развиен пристапот со **диспербуирани расејувачи - DS пиксели**. Основната идеја на DS пристапот е да се ублажат строгите услови на стандардниот PS метод, кој овозможува селекција исклучиво на пиксели со перманентен расејувач. Наместо тоа, DS пристапот овозможува вклучување и на пиксели што не задржуваат постојано висока кохерентност низ целата временска серија, но сепак содржат доволно информација за сигурна анализа (Слика 52а и Слика 63).



Слика 63 Приказ на однесувањето на амплитудите на PS и DS пиксели (модифицирано од [113])

Постојат повеќе техники и алгоритми кои се темелат на DS пристапот при InSAR временските серии. Заедничка карактеристика кај сите нив е користењето на редувантна мрежа од интерферограми, при што вкупниот број на интерферограми (M) варира во рамки на следната релација:

$$N - 1 \leq M \leq \frac{N(N - 1)}{2} \quad (61)$$

Каде:

N – Број на SAR снимки во временската серија;

M – Број на генерирани диференцијални интерферограми.

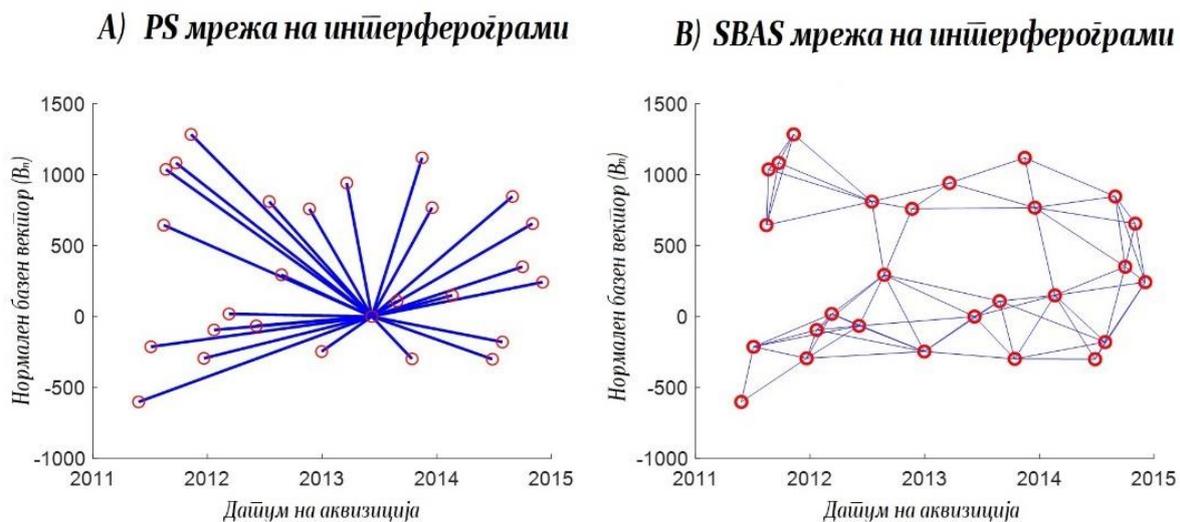
Релацијата (61) укажува дека минималниот број на интерферограми ($N-1$) е неопходен за да се обезбеди поврзана мрежа на аквизиции, додека максималниот број одговара на сите можни комбинации меѓу снимките ($\frac{N(N-1)}{2}$). Во пракса, изборот на M зависи од стратегијата за оптимизација на квалитетот на фазата и контролата на декохеренцијата.

Во продолжение ќе бидат прикажани основните карактеристики на двете најзначајни техники што произлегуваат од DS пристапот. Првата е техниката **SBAS (Small Baseline Subset)**, која се темели на анализа на демодулирани (*unwrapped*) фази и претставува класичен пример за линеарна инверзија со употреба на интерферограми со мали просторни и временски бази. Втората е **QPS (Quasi-PS)** пристапот, кој претставува модификација на стандардниот PSInSAR метод преку вклучување на DS пиксели во анализата.

3.6.1 SBAS (Small Baseline Subset) техника

SBAS техниката првично е развиена од Bernardino et al. (2002) [4], а во следните години е усовршувана, модифицирана и дополнувана од повеќе автори: [67], [10], [75], [93], [41], [21] и други. Основниот принцип на техниката се заснова на поделба на целиот сет на SAR снимки во подмножества (*subsets*), при што се формираат интерферограми со кратки просторни (B_n) и временски (B_t) базни вектори (Слика 64б). Со оваа постапка се избегнуваат интерферограмите со големи базни вектори, кои вообичаено предизвикуваат силна декохеренција. На тој начин се воспоставува редувантна мрежа на интерферограми, која е погодна за фазна анализа во подрачја со делумно кохерентни цели.

Основната идеја на SBAS техниката е редувантните интерферометриски фази да се претстават во форма на систем од линеарни равенки за инверзија. За да се овозможи оваа формулација, неопходно е претходно нивно фазно демодулирање (*unwrapping*), пред понатамошната обработка во рамките на алгоритмот. Токму оваа постапка претставува суштинска разлика во однос на класичните PS пристапот, кој работи директно со модулирани (*wrapped*) фазни вредности и користи ограничен број интерферограми, минимално потребни за да се опфати целата временска серија, при што сите се генерираат од една иста референтна снимка (Слика 64а), што овозможува временска континуираност на поместувањата.



Слика 64 Мрежа од интерферограми при: а) PSInSAR техниката и б) SBAS техниката (модифицирано од [55])

Математичката основа на SBAS се заснова на изразување на интерферометриските фазни вредности за секој пиксел во форма на систем од линеарни равенки. Ако од N SAR снимки се генерираат M интерферограми, тогаш интерферометриската фаза на i -тиот пиксел во секој интерферограм може да се запише како разлика меѓу фазите на соодветните епохи. Во матрична форма тоа се изразува согласно следната релација:

$$[\varphi]_{(M \times 1)} = [A]_{(M \times N)} \cdot [x]_{(N \times 1)} + [\Delta w]_{(M \times 1)} \quad (62)$$

Во матричната равенка изразена со релацијата (62), $[\varphi]$ претставува матрица на “сирови” интерферометриски фазни вредности на даден пиксел во сите M интерферограми, $[A]$ е матрица на коефициенти што ја дефинира поврзаноста меѓу интерферограмите и SAR аквизициите, $[x]$ е

матрица на непознатите фазни состојби на пикселот низ N SAR аквизиции, додека $[\Delta w]$ ги содржи резидуалните фазни компоненти (атмосфера, шум, грешки предизвикани од демодулирање и сл.).

Структурата на матрицата $[A]$ ја дефинира топологијата на мрежата од интерферограми. Секоја редица во матрицата $[A]$ одговара на еден интерферограм, а секоја колона на една SAR аквизиција. Во соодветната редица се внесува вредност -1 за референтната снимката, $+1$ за секундарната снимката и 0 за сите останати [4].

Со решавање на системот од равенки дефиниран со релацијата (62), фазните набљудувања на секој пиксел се израмнуваат низ сите епохи, при што добиените вредности претставуваат збир од: деформациската компонента (φ_{disp}), резидуалната топографска компонента (φ_{topo}^{res}), атмосферска компонента (φ_{atmo}) и шум (φ_{noise}). Деформациите се реконструираат преку следење на фазните промени во времето, резидуалната топографија се издвојува пропорционално на нормалниот базен (B_n), атмосферските варијации се моделираат со просторно-временски филтри со оглед на нивната силна просторна, но слаба временска корелација, додека шумот се третира како остаток кој се редуцира статистички или преку техники за подобрување на кохерентноста. На овој начин, SBAS овозможува раздвојување и истовремена проценка на повеќе извори на фазни варијации, што претставува предуслов за прецизно определување на вистинските деформациски сигнали.

Треба да се напомене дека ако матрицата $[A]$ има полн ранг (т.е. мрежата е целосно поврзана), тогаш матрица на непознатите $[x]$ може да се процени со стандардниот методот на најмали квадрати. Ако мрежата не е целосно поврзана, тогаш $[A]$ е матрица со ранг дефект, па определувањето на $[x]$ може да се изведе со сингуларна вредносна декомпозиција (SVD), односно преку псевдоинверзија [4], [56].

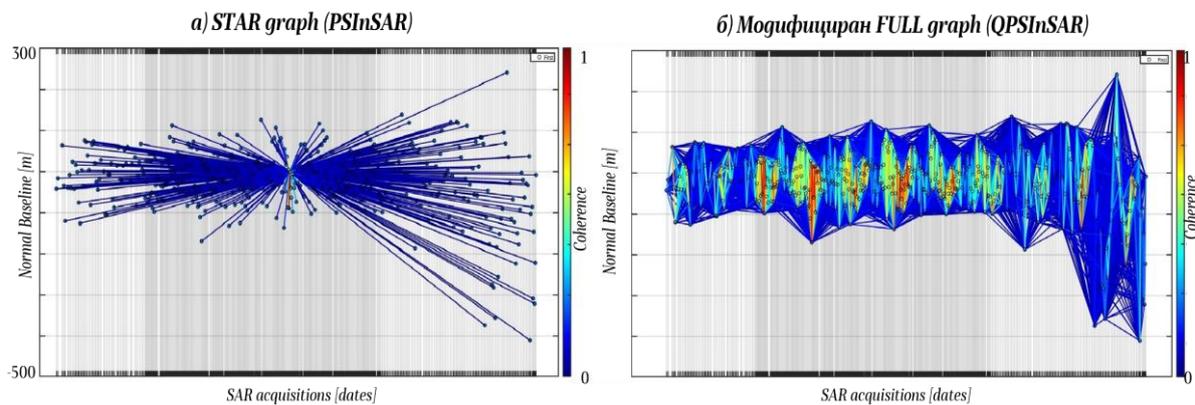
SBAS техниката претставува моќен пристап за анализа на земјини деформации, што овозможува користење на голем број интерферограми со различни временски и просторни базни вектори, со што се добива зголемена просторна покриеност и можност за следење на деформации и во подрачја со пониска кохерентност. Дополнително, методата овозможува реконструкција на нелинеарни временски серии и истовремена проценка на резидуалната топографија и деформацискиот сигнал. Сепак, SBAS има и свои ограничувања. Потребно е претходно фазно демодулирање кое е чувствително на грешки во области со ниска кохерентност. Резултатите во голема мера зависат од правилната селекција на интерферограмите, а методата покажува ограничена ефикасност во подрачја каде што се јавуваат брзи или нагли деформациски процеси. Дополнително, и покрај примената на просторно-временски филтри, атмосферските артефакти не секогаш може целосно да се елиминираат, што директно може да влијае врз точноста на конечните резултати.

3.6.2 QPSInSAR (Quasi PSInSAR) техника

Врз основа на принципите на SBAS, кој се заснова на редундантноста на интерферограмите, развиена е нова техника наречена *Quasi PSInSAR (QPSInSAR)*, која претставува модификација на класичната *PSInSAR* рамка преку проширено просторно-временско моделирање. За разлика од стандардниот *PS* пристап, кој анализира исклучиво постојано кохерентни *PS* точки, *QPS* пристапот овозможува вклучување на делумно кохерентни цели, односно *DS* точки. Овој пристап е разработен и презентираан во [98] и претставува посебна варијанта во семејството на напредни *InSAR* техники и истата е применета во нашите истражувања.

Главните карактеристики на *QPSInSAR* може да се сумираат како разлики во однос на *PSInSAR* техниката и тоа:

- Диференцијалните интерферограми не се генерираат во однос на една референтна снимка, туку се генерира *редундантна мрежа на интeрферограми*, со ограничувања по базни линии. Вообичаено се дефинира максимален временски базен вектор (B_t) од една година (Слика 65б), но тоа може да варира според користените снимки и динамиката на теренот.
- При просторно – временско моделирање за секоја *DS* точка, се воведува кохерентност, како тежински фактор при моделирањето на релативната грешка на надморската висина и брзината на поместување.
- Користење на *просторно филтрирање*, поради фазната нестабилност на *DS* точките, што не е карактеристично за класичниот *PS* пристап.



Слика 65 а) *STAR* график (*PSInSAR*), б) Модифициран *FULL* график со максимален B_t од една година (*QPSInSAR*)

На Слика 65 се претставени мрежите од интерферограми за *PSInSAR* и *QPSInSAR*. Хоризонталната оска се однесува на редоследот на аквизиција на *SAR* снимките, односно на временскиот базен вектор (B_t), додека вертикалната оска се однесува на нормалниот базен вектор (B_n) помеѓу снимките. Секоја точка од мрежата претставува една *SAR* снимка, додека секоја линија претставува интерферограм. Притоа јасно се забележува дека мрежата кај *QPSInSAR* има погуста распределба на интерферограми, што е последица на принципот на редундантност. Исто така се забележува дека секој интерферограм е обоен со различна боја, која согласно легендата означува различни вредности на *просечна интeрферометриска кохерентност* ($\bar{\gamma}^{i,k}$). Во поглавјето 3.2.2 *Интeрферометриска фазна кохерентност* подетално е презентирана суштината и значењето на интерферограмската кохерентност која се дефинира со релацијата (36) и се пресметува за секој пиксел посебно врз основа на проценувачкиот прозорец (N_p). Просечната интерферометриска кохерентност се пресметува како аритметичка средина од интерферометриските кохерентности на сите пиксели низ интерферограмот, согласно следнава релација:

$$\bar{\gamma}^{i,k} \cong \frac{\sum_p |\gamma_p^{i,k}|}{N_p} \quad (63)$$

Каде:

$\gamma_p^{i,k}$ – Интерферограмска кохерентност за секој пиксел p , добиени со релација (36);

N_p – Вкупен број на репрезентативни пиксели.

Во зависност од дефинираната мрежа на интерферограми, бројот на кохерентни интерферограми варира за секоја DS точка. Заради тоа *просторно - временско моделирање* во QPS пристапот за определување на релативната брзина на поместување (v) и релативната грешка на висината (h_{err}), за дадена точка p , се применува само на подмножество на интерферограми (m, n) што се кохерентни за истата. За таа цел, во основната релација (46) од $PSInSAR$ пристапот се воведува тежински фактор при моделирањето и се добива следната релација:

$$arg \max_{(v; h_{err})} \gamma_p = \frac{\sum_{i=1}^{(m,n)} (|\gamma_p^{(m,n)}| \cdot e^{\Delta\varphi_p^{(m,n)} - \Delta\varphi_{h_{err}}^{(m,n)} - \Delta\varphi_v^{(m,n)}})}{\sum_{i=1}^{(m,n)} |\gamma_p^{(m,n)}|} \quad (64)$$

Релацијата (64) за просторно - временско моделирање е само проширена верзија од релацијата (46). Тежинскиот фактор во релацијата (64), претставен преку изразот $\sum_{i=1}^{(m,n)} |\gamma_p^{(m,n)}|$ придонесува во проценката на брзина на поместување (v) и релативната грешка на висината (h_{err}) за точката p доминантно влијание да имаат интерферограмите со повисока кохерентност. Во случај на тежина еднаква на еден, тогаш моделирањето се однесува на PS точка. Примената на овој принцип овозможува да се открие физичката природа на дистрибуираните расејувачи (DS точки), кои имаат кохерентност во одреден дел од користениот датасет.

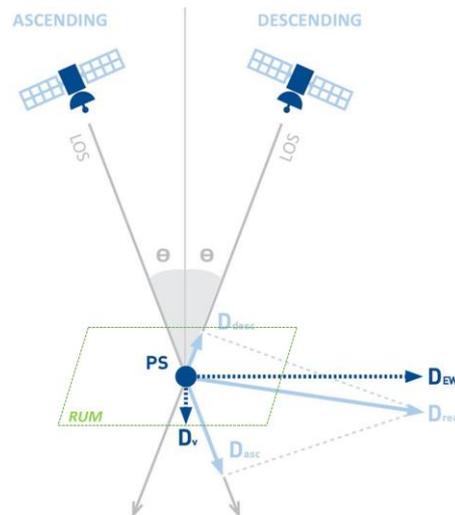
Поради фазната нестабилност и присуството на фазен шум кај DS точките, неопходно е *просторно филтрирање* пред да се примени релацијата (64). Целта е да се подобри односот сигнал/шум (*Signal to Noise Ratio - SNR*). Последица од просторното филтрирање е намалување на просторната резолуција, што е неизбежен недостаток на секоја DS базирана техника. Постојат повеќе типови на филтрирање, но за оваа цел се препорачуваат филтрите базирани на мулти-темпоралните адаптивни маски (*Multi-Temporal Adaptive Mask*), чија математичка основа е изнесена во [90], од кои се издвојуваат алгоритмите за *Колмоџоров - Смирнов шесџи* и *Андерсон - Дарлинг шесџи*.

Треба да се нагласи дека QPS претставува надградба на $PSInSAR$ и се применува дури по оценка и отстранување на атмосферската компонента APS . За проценката и корекцијата на APS се користи стандардниот $PSInSAR$ врз мрежа од PS кандидати, како што е детално опишано во поглавје 3.2 *Атмосферско (APS) моделирање (голема површина)*; Дури по оваа корекција се спроведува QPS анализата врз DS точките.

3.7 ГЕОМЕТРИСКА И МАТЕМАТИЧКА ОСНОВА ЗА ДЕКОМПОЗИЦИЈА НА $INSAR$ РЕЗУЛТАТИТЕ

Во претходните поглавја беа обработени основните принципи на радарската аквизиција и $InSAR$, при што во повеќе наврати беше потенцирано значењето на *правецот на аквизиција (Line of Sight - LOS)*, *аголот на аквизиција (θ)* и *орбиталната геометрија (расечка и ојагачка орбита)* на сателитите. Овие параметри (графички прикажани на *Слика 2*, *Слика 9* и *Слика 12*) ја дефинираат $InSAR$ геометријата, односно го опишуваат односот помеѓу траекторијата на сателитот, насоката на аквизиција на радарот и реалното тродимензионално поместување на површината од интерес. Нивното правилно разбирање претставува основа за точна интерпретација на резултатите и за воспоставување на математичката врска помеѓу определените $InSAR$ поместувања и реалните компоненти на поместувањето.

Поместувањата добиени со *InSAR* од единечна орбита претставуваат проекција на тродимензионалното движење на површината во насоката на снимање (*LOS*). Со други зборови, физичките поместувања кои во просторот се изразуваат преку трите компоненти на *XYZ* координатниот систем, во *InSAR* анализата се прикажуваат само преку нивната проекција во линијата на аквизиција на радарот. Доколку за истата површина се применат две независни *InSAR* анализи, една од растечка, а друга од опаѓачка орбита, тогаш се добиваат две различни проекции на истото движење, една во растечка и една во опаѓачка *LOS* насока (Слика 66).



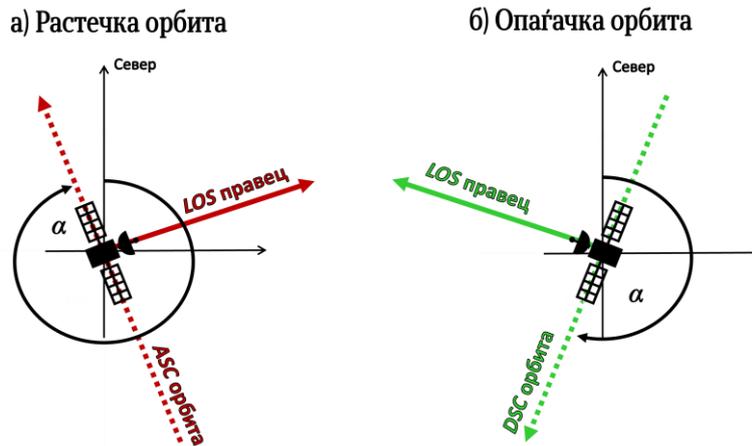
Слика 66 Приказ на *LOS* поместувања во растечка (*ascending*) и опаѓачка (*descending*) орбита (модифицирано од [113])

Иако анализата од двете орбити овозможува различни перспективи на истото подрачје, треба да се има предвид дека радарот не „гледа“ идентично од двете орбити. Поради различниот агол на снимање (θ) и насоката на аквизиција, расејувачето на електромагнетните бранови од површината не е исто за растечката и за опаѓачката орбита. Како резултат на тоа, дел од расејувачите кои покажуваат стабилна кохерентност и се идентификуваат како *PS* или *DS* точки во едната орбита, може да се декорелираат или воопшто да не бидат детектирани во другата. На пример, при растечка орбита можно е да се добие поголем број *PS* точки на источните падини на теренот, додека при опаѓачка орбита тие може да бидат заменети со *DS* точки или целосно отсутни. Овие разлики во видливоста и кохерентноста на расејувачите се должат на геометријата на снимање и претставуваат важен фактор при комбинирање на податоците од двете орбити.

За да се надминат овие разлики во видливоста и бројот на кохерентни точки меѓу растечката и опаѓачката орбита, во процесот на комбинирање на резултатите се применува концептот на **област на униформно движење** (*Region of Uniform Motion - RUM*) [91]. Овој пристап претставува методолошко решение со кое површината од интерес се дели на просторни единици во рамките на кои се претпоставува дека сите точки имаат идентичен вектор на поместување. Со тоа, дури и кога поединечните расејувачи (*PS* или *DS*) не се совпаѓаат во двете геометрии, добиените *LOS* поместувања може конзистентно да се комбинираат и да се изведе заедничка *декомпозиција* на поместувањата. Декомпозиција е вообичаен *InSAR* термин за разделување на поместувања на нивните просторни компоненти.

SAR сателитите орбитираат во блискополарни, хелиосинхрони орбити, чија траекторија не се совпаѓа целосно со меридијаните. Овој тип на орбита овозможува постојани услови на

осветлување и повторливост на набљудувањата, бидејќи сателитот поминува над истата област на Земјата секогаш во исто локално време. Како резултат на тоа се појавува мала агловна отстапка меѓу орбиталниот правец и север-југ насоката. Овој агол се нарекува азимутален (*heading*) агол (α) и претставува важен параметар во геометријата на *InSAR* мерењата, бидејќи ја опишува ориентацијата на сателитот во хоризонталната рамнина (Слика 67). Кај *Sentinel-1* снимките, за територијата на нашата држава, азимутален агол во растечка орбита изнесува околу 350° , додека за опаѓачка орбита изнесува околу 190° .



Слика 67 Геометриски приказ на азимуталниот агол во а) растечка и б) опаѓачка орбита

Знаејќи ги аголот на аквизиција (θ) и азимуталниот агол (α) на користените SAR снимки, може да се постави математичката основа за поврзување на измереното *LOS* поместување со реалните компоненти на движењето. Со други зборови, *LOS* поместувањето може математички да се претстави како комбинација од источната (d_E), северната (d_N) и вертикалната (d_V) компонента, согласно следнава релација:

$$d_{LOS} = -\sin \theta \cdot \cos \alpha \cdot d_E - \sin \theta \cdot \sin \alpha \cdot d_N + \cos \theta \cdot d_V \quad (65)$$

Комбинирањето на податоците од растечката и опаѓачката орбита овозможува добивање на две независни проекции на реалната тродимензионална деформација, секоја долж свој соодветен *LOS* правец. Сепак, бидејќи реалното поместување има три компоненти (d_E , d_N , d_V), а на располагање се само две мерења (две равенки), системот останува неопределен. Со изоставување на една од компонентите, најчесто северната (d_N), поради ниската чувствителност на радарот во таа насока можно е да се пресметаат **вертикалната** (d_V) и **источно-западната** (d_E) компонента на поместувањето. Во согласност со оваа поставеност и со користење на концептот на област на униформно движење (*RUM*) во *InSAR* праксата најчесто се применува следната релација за декомпозиција на поместувањата на вертикална и источно-западна компонента:

$$\begin{cases} d_{LOS}^{asc} = -\sin \theta_{asc} \cdot \cos \alpha_{asc} \cdot d_E + \cos \theta_{asc} \cdot d_V \\ d_{LOS}^{dsc} = -\sin \theta_{dsc} \cdot \cos \alpha_{dsc} \cdot d_E + \cos \theta_{dsc} \cdot d_V \end{cases} \quad (66)$$

4. ПРИМЕНА НА *INSAR* ТЕХНИКИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИ

4.1 КОНЦЕПТ И ЦЕЛИ НА ПРИМЕНЕТИТЕ АНАЛИЗИ

По претходно воспоставената теоретска рамка и деталната разработка на методолошките принципи на напредните *InSAR* техники, во оваа глава преминуваме кон нивна практична примена врз реални подрачја со различни морфолошки, структурни и функционални особености, распоредени низ територијата на нашата држава. Основната цел е да се прикаже применливоста, ефикасноста и точноста на *InSAR* методологијата за следење и анализа на земјини деформации под различни геоморфолошки и инфраструктурни услови, како и да се оценат нејзините ограничувања во зависност од типот на површината, природата на расејувачите и достапноста на сателитските податоци.

Концептот на анализата се заснова на три студии на случај, внимателно избрани за да опфатат мониторинг на геометриската стабилност во урбана и рурална средина, како и на еден инженерски објект. Целта е да се обезбеди репрезентативна проценка на применливоста и точноста на *InSAR* техниките под различни сценарија на теренот и неговата функционална намена.

Во таа насока, предмет на анализа се следните три студии на случај:

1. **Мониторинг на деформации во урбаната зона на Скопската Котлина;**
2. **Мониторинг на деформации во Полошката Котлина и нејзината планинска околина;**
3. **Мониторинг на деформации на насоката брана Лисиче.**

Првата студија ја опфаќа урбаната зона на Скопската Котлина, како сеизмички активно подрачје кое во континуитет е предмет на научни истражувања насочени кон следење и анализа на нејзината геодинамичка стабилност. Во рамките на оваа студија беа спроведени вкупно три независни анализи, од кои две *InSAR* анализи со користење на сите достапни *Sentinel-1 SLC (C-band)* снимки од растечка и опаѓачка орбита, со цел да се обезбеди двојна геометриска перспектива и да се изврши декомпозиција на добиените *LOS* поместувања во вертикална и источно-западна компонента. Дополнително, за истиот регион беше направена уште една *InSAR* анализа, каде беа обработени вкупно 82 снимки од мисијата *TerraSAR-X (X-band)* во растечка орбита, кои го опфаќаат периодот од средината на 2020 до почетокот на 2024 година, со цел да се овозможи валидација и компаративна анализа на резултатите добиени со *Sentinel-1* снимките.

Врз основа на овие три независни анализи беа детектирани поголеми поместувања на ограничена површина во населбата Припор, што иницираше потреба за дополнителни, локално насочени *InSAR* процесирања. Овие анализи овозможија подетално издвојување на зоните со најизразени деформациски трендови и квантификација на нивната насока и интензитет во текот на анализираниот период, при што беше утврдено дека поместувањата се локализирани во рамките на релативно мала зона, што укажува на постојано, но просторно концентрирано дејствување на геодинамички процеси. Дополнително, споредбата на резултатите добиени од различни сателитски мисии *Sentinel-1* и *TerraSAR-X* покажа висока усогласеност, бидејќи иако

анализите потекнуваат од целосно независни извори на податоци, тие прикажуваат речиси идентични деформациски трендови, што ја потврдува сигурноста на применетата методологија.

Втората студија ги опфаќа Полошката Котлина и нејзината поблиска планинска околина. Ова подрачје се карактеризира со изразена топографија и сложени геоморфолошки услови, кои значително влијаат на кохерентноста на радарскиот сигнал. Истражувањето беше насочено кон идентификација на зони со потенцијални деформациски процеси и процена на применливоста на напредните *InSAR* техники во средини со пониска густина на стабилни расејувачи. За таа цел беа спроведени две *InSAR* анализи со користење на сите достапни *Sentinel-1 SLC* снимки од растечка и опаѓачка орбита.

Врз основа на добиените резултати беа детектирани локализирани поместувања во подрачјата на селата Селце и Раковец, во близина на Тетово, што поттикнува спроведување подетални, локално насочени анализи со повисока просторна резолуција. Овие дополнителни обработувања овозможуваат попрецизна идентификација на активните деформациски процеси на падините околу населените места и потврдија дека напредните *PSInSAR/QPSInSAR* пристапи обезбедуваат сигурни и конзистентни резултати дури и во комплексни планински услови.

Третата студија се однесува на мониторинг на деформации на насипната брана Лисиче, која се наоѓа на истоимената вештачка акумулација со основна функција за водоснабдување и наводнување во регионот на Велес и Чашка. Истражувањето е насочено кон проценка на применливоста на *InSAR* техниките за следење на стабилноста на брани и нивна споредба со резултатите добиени од класични геодетски мерења. За таа цел беа обработени сите достапни *Sentinel-1 SLC* снимки од растечка и опаѓачка орбита, по што беше извршена декомпозиција на добиените *LOS* поместувања во вертикална и источно-западна компонента.

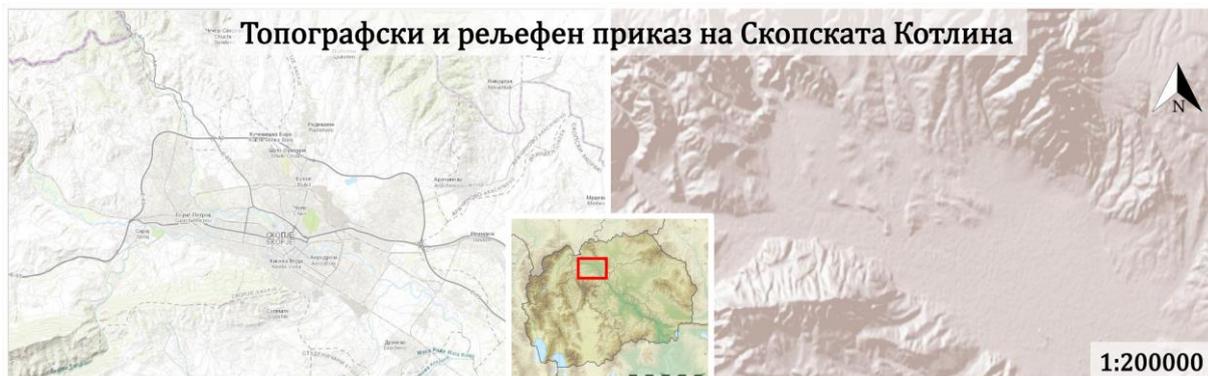
Споредбата на *InSAR* резултатите со геодетските мерења покажа висока согласност во трендовите на хоризонталните и вертикалните поместувања, со минимални отстапувања кои се движат во рамките на очекуваните толеранции. Ваквата конзистентност потврдува дека *InSAR* претставува доверлива и економично ефикасна техника за долгорочен мониторинг на брани, со потенцијал да се користи како комплементарен извор на информации на постојните оскулациски системи. Дополнително, резултатите ја потврдуваат високата компатибилност меѓу сателитските и класичните геодетски методи, што придонесува кон воспоставување на поробуствен и интегриран систем за проценка на стабилноста на вакви објекти.

Со спроведувањето на трите студии на случај, истражувањето овозможува сеопфатна проценка на применливоста и сигурноста на *InSAR* методологијата во различни просторни и морфолошки услови. Притоа, фокусот не е насочен кон утврдување на причините за определените деформации, туку кон демонстрација на потенцијалот на *InSAR* како современа мерна техника за геометриско следење и анализа на поместувањата на теренот. Преку урбаната анализа на Скопје, планинско-руралната студија во Полошката Котлина и деформацискиот мониторинг на браната Лисиче, се обезбедува репрезентативен пресек на типични средини со различна кохерентност и функционална намена. Заедничкиот увид од овие анализи потврдува дека *InSAR* техниките претставуваат прецизен, доверлив и економично оправдан инструмент за долгорочно следење на земјини деформации, со потенцијал за интеграција во националниот систем за геодинамички и инфраструктурен мониторинг.

4.2 МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИ ВО УРБАНАТА ЗОНА НА СКОПСКАТА КОТЛИНА

4.2.1 Карактеристики на Скопската Котлина

Скопската Котлина претставува пространа тектонска депресија со изразена морфолошка и сеизмотектонска активност, сместена во северниот дел на Република С. Македонија. Таа е ориентирана во насока северозапад-југоисток и се протега на должина од околу 25 km, со просечна ширина од 8 до 10 km. Котлината е опкружена со планините: Водно на југ, Скопска Црна Гора на север и Жеден на запад, која претставува типичен грабен, ограничен со хорстови на јужниот и северниот раб. Надморската височина на котлинското дно се движи помеѓу 220 и 300 m, при што најниските делови се развиени долж долината на реката Вардар, кој претставува главен хидрографски елемент на подрачјето. Централниот дел има претежно рамничарски карактер, додека периферните зони се благо наклонети и постепено преминуваат во повисоки ридски и планински предели кои го ограничуваат просторот на котлината.



Слика 68 Топографски (лево) и релјефен (десно) прикази на Скопската Котлина

Геолошката градба на Скопската котлина се карактеризира со комплексна тектонска еволуција и стратиграфска разноликост. Основата ја сочинуваат метаморфни и магматски карпи од палеозојска старост, врз кои се наталожени неогенски седименти од типот на песоци, конгломерати и лапори, додека најгорниот дел е изграден од кватернарни алувијални и делувијални наноси настанати под влијание на реката Вардар и нејзините притоки. Овие дебели седиментни наслаги, кои локално достигнуваат и над 1000 метри, значително влијаат врз механичките својства на подлогата и ја зголемуваат сеизмичката подложност на подрачјето [27].

Во рамките на котлината е сместен градот Скопје, кој претставува најголем урбан, економски и административен центар во државата. Тој воедно е и најгусто населен простор во државата, со изразена динамика на урбан развој и континуирана експанзија на градежните и инфраструктурните капацитети. Ваквата интензивна изградба, придружена со развој на објекти со различна функционална намена, значително влијае врз карактерот на површината и локалните геодинамички услови. Урбаната комплексност, во комбинација со тектонската активност и хетерогената геолошка подлога, создава реална потреба од постојано следење на стабилноста на теренот преку современи и високо-прецизни техники за детекција на микродеформации.

Скопската Котлина е историски позната по својата сеизмичка активност, најсилно изразена со катастрофалниот земјотрес од 26 јули 1963 година со магнитуда 6.1 според Рихтеровата скала,

кој предизвика големи штети и човечки загуби. Овој настан ја потврди високата сеизмичка подложност на регионот и ја нагласи важноста на континуираниот мониторинг на земјините деформации и стабилноста на урбаната структура.

Комбинацијата од густо изграден урбан простор, изразена тектонска активност и присуство на голем број стабилни расејувачи ја прават Скопската Котлина особено погодна за примена на InSAR техники. Ваквата конфигурација овозможува прецизно и долгорочно следење на површинските поместувања, дури и во сложени урбани услови каде традиционалните геодетски методи се ограничени поради недоволната просторна и временска покриеност на мерењата. InSAR пристапот обезбедува просторна континуираност, висока точност и можност за ретроспективна анализа на земјините деформации, што го прави извонредно средство за геодинамички и урбан мониторинг.

4.2.2 InSAR анализи со Sentinel-1 снимки на урбаната зона на Скопската Котлина

Анализата на урбаната зона на Скопската Котлина се засновува на обработка на сателитски податоци од мисијата Sentinel-1, која обезбедува континуирани C-band SAR снимки ($\lambda = 5.6 \text{ cm}$) со просторна резолуција од околу $5 \times 20 \text{ m}$ во Interferometric Wide Swath (IW) режим. За потребите на ова истражување беа искористени сите достапни SLC (Single Look Complex) снимки од растечката (ascending) и опаѓачката (descending) орбита за периодот од октомври 2014 до февруари 2025 година, со цел да се обезбеди двојна геометриска перспектива на поместувањата на површината и можност за нивна декомпозиција во вертикална и источно-западна компонента.

Сателитските податоци од мисијата Sentinel-1 се целосно бесплатни и јавно достапни во рамките на европската програма Copernicus, под покровителство на Европската вселенска агенција (ESA) и Европската комисија. Истите беа набавени преку Alaska Satellite Facility - Vertex порталот, кој овозможува директен пристап до целосната архивска колекција на Sentinel-1 податоци. Процесот на симнување на податоците беше извршен со специјално развиена Python скрипта, базирана на модификација на оригиналниот пакет copernicus_dl-2. Развиената верзија беше прилагодена за автоматизирано симнување на Sentinel-1 SLC снимки само од избрани интерферометриски појаси (IW1, IW2 или IW3) и VV (вертикална) поларизација, во зависност од конкретните потреби на анализата и позицијата на областа од интерес. Оваа функционалност овозможи значително намалување на големината на преземените податоци и оптимално користење на меморискиот простор, што беше од особено значење при работа со големите временски серии. Со елиминација на непотребните датотеки и автоматизација на филтрацијата по орбита и појас, работниот процес беше значително оптимизиран, а управувањето со архивата на снимки направено поефикасно. Деталниот код на скриптата, заедно со опис на параметрите се прикажани во 7.1 Прилог 1.

Во почетната фаза на истражувањата, обработката на сателитските податоци беше изведувана со користење на SNAP и STaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) софтверските пакети, кои претставуваат широко прифатени алатки за интерферометриска анализа на Sentinel-1 податоци. Овие иницијални тестирања овозможија воспоставување на основна методолошка рамка и потврда на применливоста на достапните сценарија за анализираното подрачје.

Во рамките на академска соработка и престој на Универзитетот во Љубљана, беа спроведени и неколку експериментални процесирања во комерцијалниот софтвер SARscape (ENVI), со цел

споредба на прецизноста, стабилноста и времетраењето на процесирањето помеѓу различни софтверски платформи.

Во финалната фаза на истражувањето беше применет **SARPROZ**, комерцијален **MATLAB** базиран софтвер развиен од проф. *Daniele Perissin*, специјализиран за обработка и анализа на интерферометриски временски серии на податоци. **SARPROZ** претставува целосно интегрирана платформа која овозможува прецизна контрола врз сите параметри на **InSAR** процесирањето, од иницијално орбитно порамнување до моделирање на фазни резидуали. Софтверот поддржува широк спектар на техники, вклучително: *DInSAR*, *PSInSAR* и *QPSInSAR*.

Резултатите од овие тестови покажаа дека иако сите софтверски решенија овозможуваат сигурна примена на **InSAR** техники, **SARPROZ** се издвојува по својата висока ефикасност, флексибилност во параметризацијата и деталната контрола на процесот на фазна анализа. Врз основа на добиените споредбени резултати, понатамошните анализи во рамките на оваа докторска дисертација беа целосно изведени со **SARPROZ**, кој обезбедува интегрирана средина за изведување на *PSInSAR* и *QPSInSAR* обработка, атмосферско моделирање (*APS*), геореференцирање и можност за различни начини на визуелизација на резултатите.

Во продолжение се презентирани **InSAR** процесирањата на урбаната зона на Скопската Котлина со користење на *Sentinel-1* податоци, поделени во три тематски целини со цел појасно прикажување на методолошкиот пристап и добиените резултати. Прво е извршено процесирање на податоците од растечката (*ascending*) орбита, потоа независна обработка на опаѓачката (*descending*) орбита, а на крајот е спроведена декомпозиција на добиените *LOS* поместувања во вертикална и источно-западна компонента.

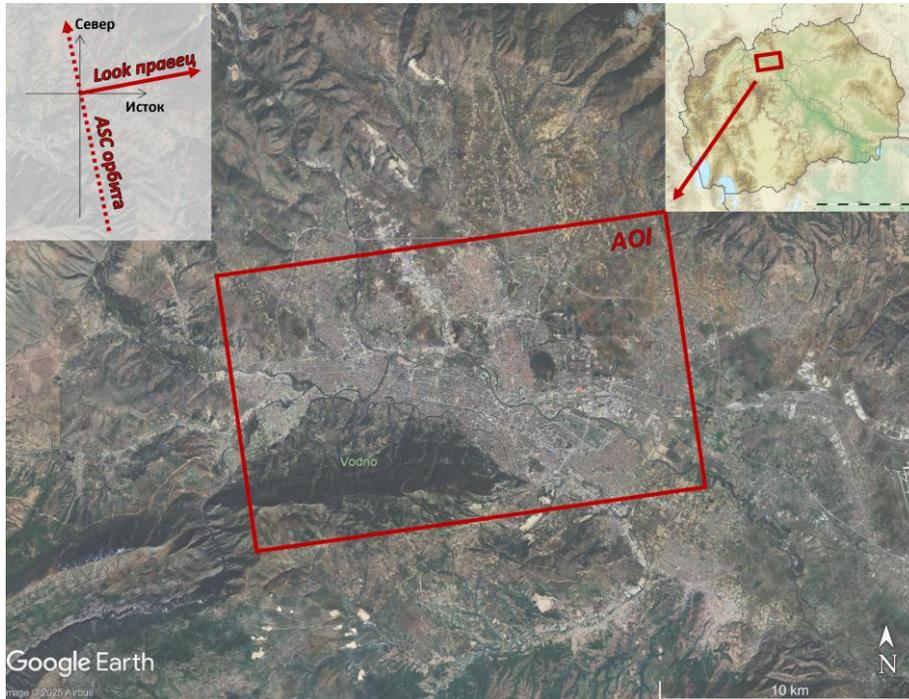
➤ **InSAR процесирање на Sentinel – 1 снимки од растечка (*ascending*) орбита**

Во согласност со претходно опишаната постапка за автоматизирано симнување на сателитски податоци, преку развиената *Python* скрипта беа набавени *Sentinel-1 SLC* снимки од растечката (*ascending*) орбита, кои претставуваат влезни податоци за изведување на напредните **InSAR** анализите во ова истражување. Избраните снимки ја покриваат целата урбана зона на Скопската Котлина, обезбедувајќи доволна временска и геометриска конзистентност за примена на оваа методологијата. Основните карактеристики на употребените *Sentinel-1* снимки во растечката орбита се прикажани во следната табела.

Табела 2 Основни карактеристики на користените *Sentinel-1* снимки за анализа на урбаната зона од Скопската Котлина (растечка орбита)

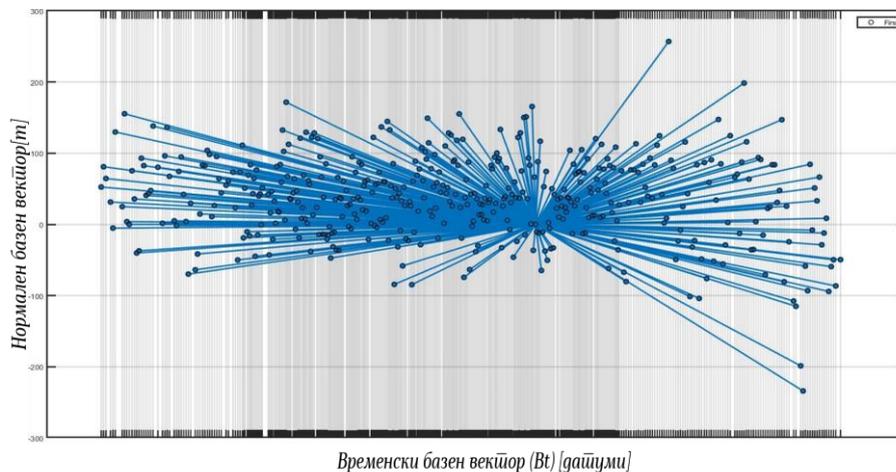
Број на <i>SLC</i> снимки	449
Анализиран временски период	Октомври 2014 – Февруари 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален пати	102
<i>TOPS</i> појас	IW 1
Агол на аквизиција (θ)	43.9°
Азимутален агол (α)	350.3°

На Слика 69 е прикажан просторниот опфат на анализираната област во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина, заедно со геометријата на аквизиција на *Sentinel-1* сателитот во растечка (*ascending*) орбита, прикажана во горниот лев агол.



Слика 69 Приказ на анализаната површина (AOI) за Скопската Котлина со *Sentinel-1* (*ascending* снимки)

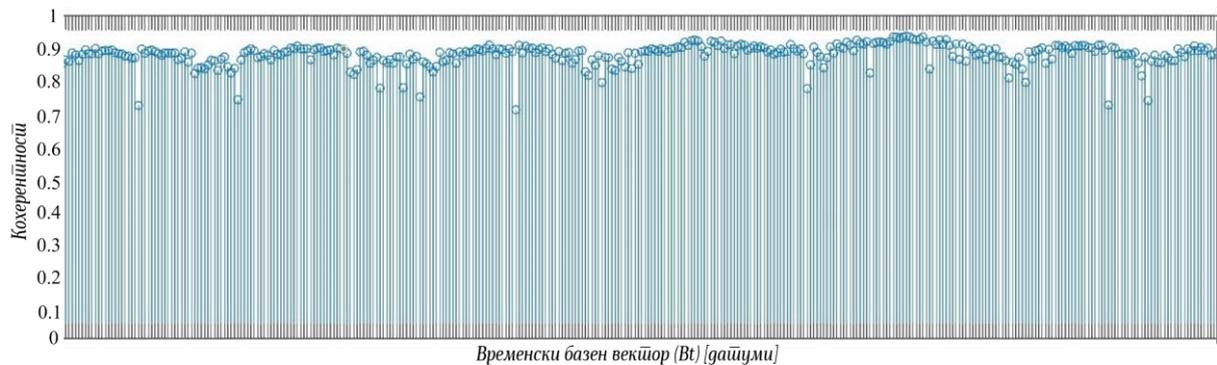
Обработката на *Sentinel-1* SLC снимките во растечка орбита беше изведена во софтверот SARPROZ. Вообичаено, *InSAR* временските анализи започнуваат со *PSInSAR* техниката, при што најпрво беше дефинирана примарна снимка, аквизирана на **27.10.2020 година**, во однос на која сите останати секундарни снимки се корегистрирани за формирање на диференцијалните интерферограми. По извршената орбитална корекција и прецизна корегистрација, беа генерирани диференцијалните интерферограми, со цел обезбедување оптимална кохерентност и просторна покриеност. На Слика 70 е прикажан *STAR* графикот за креирање на диференцијалните интерферограми, од *PSInSAR* техниката, во рамките на SARPROZ околината.



Слика 70 *STAR* график за *PSInSAR* анализа за урбаната зона на Скопската Котлина со *Sentinel-1* снимки од растечка орбита

По креирањето на интерферометриската мрежа, следеа низа прелиминарни чекори неопходни за подготовка на податоците пред определување на атмосферскиот фазен прозорец (APS) и просторно-временското моделирање на мрежата од PS точки. Најпрво од интерферометриската фаза беа отстранети орбиталната (*earth-flat*) и топографската компонента со користење на дигиталниот теренски модел *Copernicus DEM (GLO-30)*. Потоа беше пресметан индексот на амплитудна стабилност за секој пиксел, по што беше дефинирана контролна точка (GCP) со цел прецизно геокодирање на користените SAR снимки во WGS 84 координатниот систем.

Определувањето на атмосферскиот фазен прозорец (APS) беше спроведено врз основа на мрежа составена од вкупно 3417 PS кандидати со индекс на амплитудна стабилност поголем од 0.7. Високата густина и рамномерната просторна распределба на овие стабилни расејувачи овозможува сигурна инверзија на фазните параметри и стабилна проценка на атмосферските варијации на секоја од користените снимки. Резултатите од тестот за кохерентност укажуваат на висок степен на конзистентност во рамките на мрежата, што потврдува дека елиминацијата на атмосферската компонента е успешно спроведена (Слика 71).



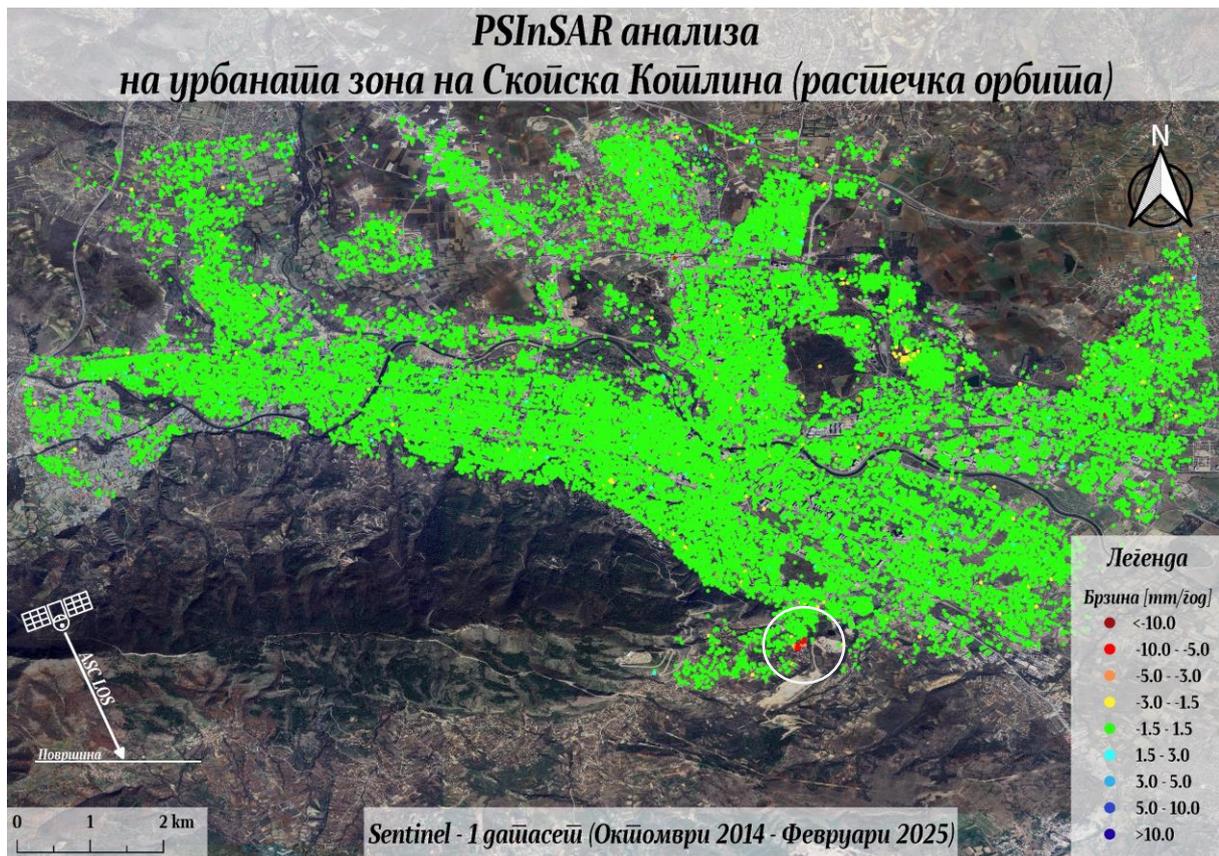
Слика 71 Тест на определеније APS за секоја користена снимка во анализата на урбаната зона на Скопската Колина (ascending гатисеј)

По определувањето на APS за секоја снимка, беше спроведен завршниот чекор од *PSInSAR* техниката, односно просторно-временско моделирање на стабилните расејувачи. Селекцијата на точките беше извршена врз основа на индекс на амплитудна стабилност да е поголем од 0.5, при што беа анализирани вкупно 60062 PS точки. Урбаниот карактер на подрачјето, придружен со голема густина на стабилни расејувачи (згради, инфраструктура, објекти со постојана радарска рефлексија), овозможи примена исклучиво на *PSInSAR*, без потреба од примена на *DS* пристапот. Динамиката на поместувањата е опишана преку примена на линеарно моделирање, кое овозможува сигурна и прецизна проценка на трендовите на деформација во рамките на анализираниот временски интервал. За референтна точка беше избрана точката со најголем индекс на амплитудна стабилност од 0.96, чии координати се прикажани во Табела 3.

Табела 3 Координати на референтната точка при *PSInSAR* анализата на урбаната зона на Скопската Колина, со SAR снимките од расејувачката орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
1888	512	42° 00' 55.94"	21° 23' 55.03"

Врз основа на дефинираната референтна точка беа пресметани релативните брзини на поместување за сите *PS* точки вклучени во просторно-временското моделирање. Во рамките просторното – временско моделирање беа детектирани вкупно **33160 *PS* точки** со временска кохерентност (γ) поголема од 0.6, а просечната вредност на временската кохерентност за целата мрежа изнесува 0.85, што укажува на висок степен на конзистентност и сигурност на податоците. Резултатите од извршената *PSInSAR* анализа, добиени со користење на *Sentinel-1* снимките од растечката орбита, ја прикажуваат просторната распределба и брзината на *LOS* поместувањата од растечката орбита во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина (Слика 72).

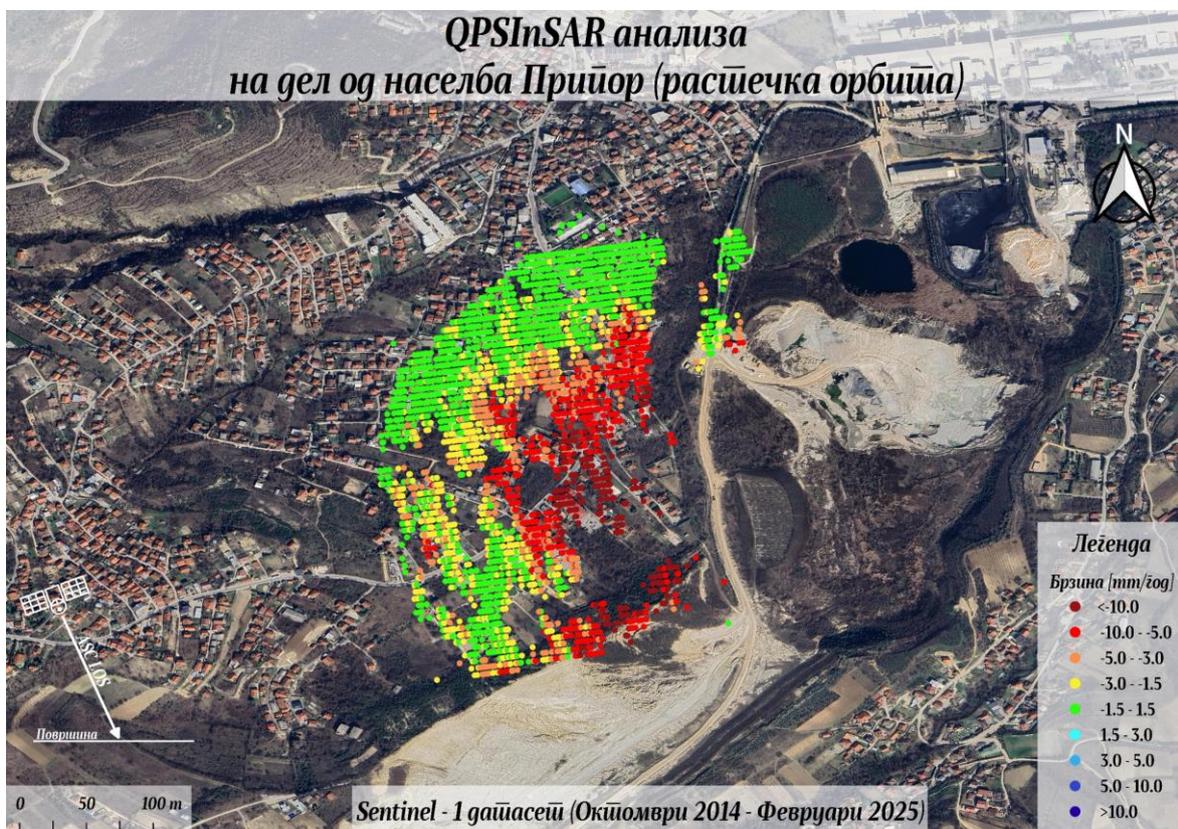


Слика 72 Просторна распределба на *PS* точки и брзини на поместување (mm/год) за урбаната зона на Скопската Котлина – растечка орбита (*Sentinel-1*)

Резултатите од *PSInSAR* анализата за урбаната зона на Скопската Котлина, прикажани на Слика 72, укажуваат на стабилна состојба во анализираниот период (2014–2025). Најголемиот дел од површината се карактеризира со минимални поместувања, во рамките на ± 1 mm/год, што укажува на долгорочна стабилност на теренот и отсуство на значајни деформациски процеси во урбаното подрачје. Но и покрај севкупната стабилност на теренот, во најјужниот дел од котлината (на Слика 72 означен со бела кружница), во рамките на населбата Припор, е евидентирана локализирана зона со изразено негативни брзини на поместување. Овие вредности укажуваат на континуирано слегнување на теренот во насока на правецот на аквизиција (*LOS*) на растечката орбита. Детектираната зона на поместување претставува локално издвоена нестабилна област во однос на генералната стабилност на околниот простор и послужи како основа за спроведување на дополнителни, локално насочени детални *InSAR* анализи користејќи ги *PS* и *DS* пристапите за тоа подрачје во населбата Припор, а резултатите се прикажани на Слика 73 и Слика 74.



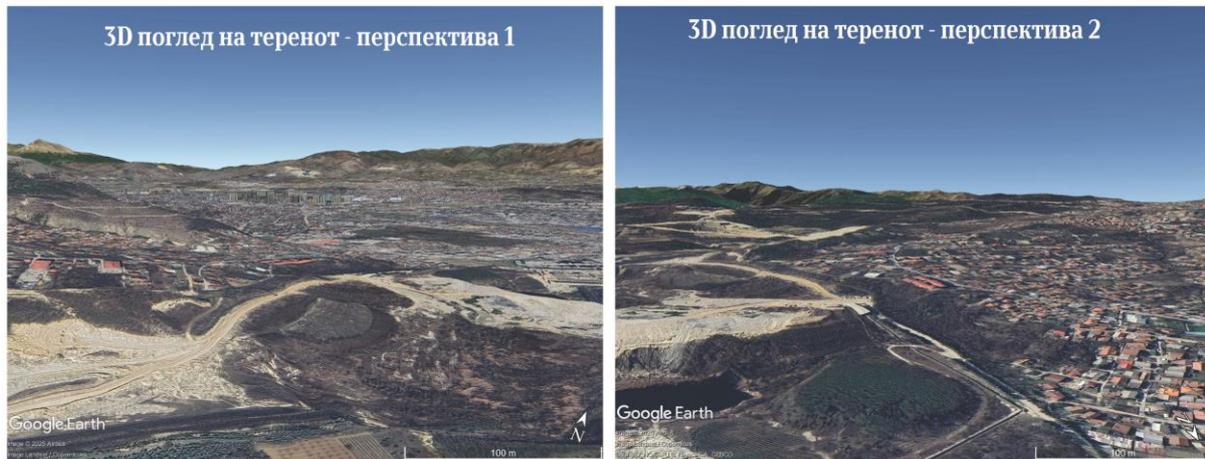
Слика 73 PSInSAR анализа за локално несџабилна зона од населба Пријор, расипечка орбија (Sentinel-1)



Слика 74 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона од населба Пријор, расипечка орбија (Sentinel-1)

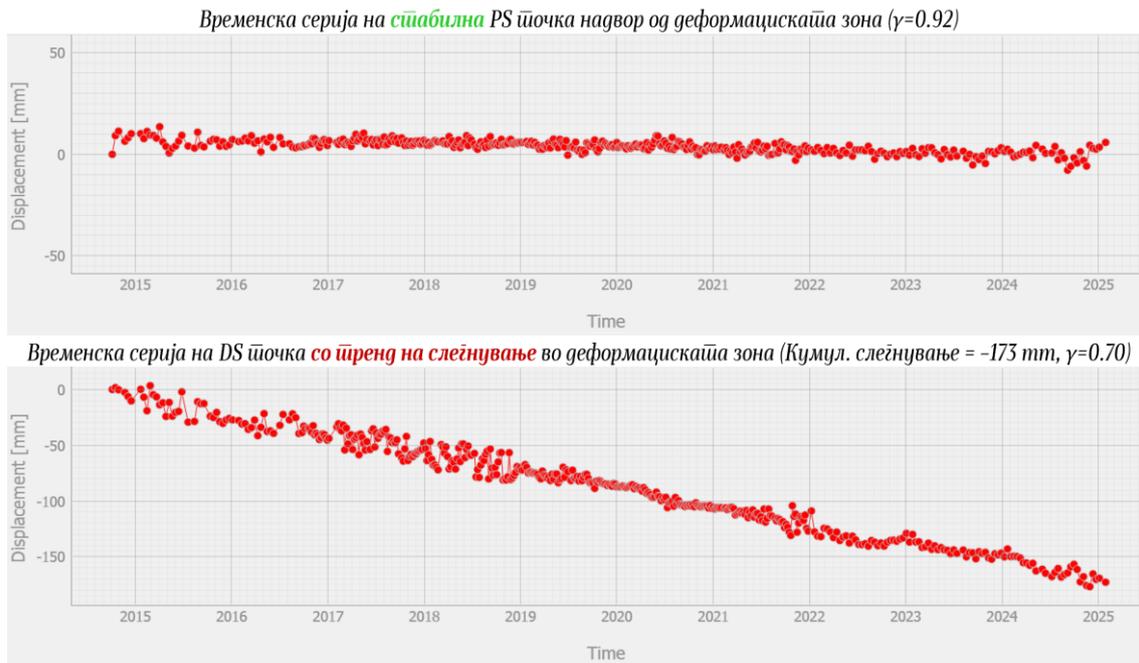
На Слика 73 се прикажани резултатите од *PSInSAR* анализата на локализираното подрачје во рамките на населбата Припор, западно од активните ископи на цементарница „Усје“. Во анализата беа вклучени сите идентификувани точки во рамките на потенцијално нестабилната зона, при што беа детектирани вкупно **1247 PS точки** со темпорална кохерентност (γ) поголема од 0.6 и просечна темпорална кохерентност од 0.71. Резултатите укажуваат на јасно изразени слегнувања во насока на правецот на аквизиција (*LOS*) на растечката орбита, при што максималното кумулативно поместување надминува **-14 cm** во поединечни точки, а максималната релативна брзина на поместување достигнува **-13 mm/годишно** во анализираниот период. Просечното кумулативно поместување на сите точки во критичната зона изнесува околу **-9 cm** во анализираниот период.

Со цел да се добие поголема просторна густина на мерењата и подобра дефиниција на зоните на деформација, беше спроведена дополнителна *QPSInSAR* анализа, чии резултати се прикажани на Слика 74. Преку оваа техника беа идентификувани вкупно **3541 QPS точки** со темпорална кохерентност над 0.6 и просечна вредност од 0.75. Анализираното подрачје претставува благо издигнат терен над цементарница „Усје“, каде деформациските процеси се најизразени по должината на благозакосената падина, веднаш над ископите (Слика 75). Максималните кумулативни слегнувања достигнуваат до **-18 cm** во анализираниот период, додека кај повеќе точки релативната брзина на поместување надминува **-17 mm/годишно**. Притоа и во овој случај просечното *LOS* поместување на сите точки во критичната зона изнесува околу **-9 cm**. Дополнителната обработка овозможи појасна диференцијација на нестабилната зона и потврди дека во овој дел се одвиваат активни процеси на слегнување со јасно изразен просторен карактер и забележлив деформациски тренд.



Слика 75 3D приказ на благозакосниот терен над цементарница „Усје“ (Google Earth)

За секоја детектирана точка во рамките на деформациската зона, *InSAR* временските серии (*PSInSAR* и *QPSInSAR*) овозможуваат детално следење на динамиката на поместувањата низ целиот анализиран период. На Слика 76 се прикажани примери од временските серии на две точки: стабилна *PS* точка со темпорална кохерентност од 0.92 и *DS* точка со темпорална кохерентност од 0.70, која јасно го илустрира трендот на континуирано слегнување со вкупно кумулативно слегнување од **-173 mm** во правецот на аквизиција на растечката орбита. Ваквите графички прикажани временски серии претставуваат важен сегмент од анализата, бидејќи овозможуваат детален преглед на деформациските процеси и идентификација на потенцијално активни зони и се основа за понатамошна интерпретација и геодетска или геотехничка верификација на добиените резултати.



Слика 76 Приказ на временските серии на PS стабилна точка и DS точка со тренд на слегнување од InSAR анализите со Sentinel - 1 снимки од расипачка орбита

➤ **InSAR процесирање на Sentinel - 1 снимки од опаѓачка (descending) орбита**

Аналогно на обработката на снимки од растечката орбита, беше спроведено и *PSInSAR* процесирањето на *Sentinel-1 SLC* снимките од опаѓачката (*descending*) орбита, со цел да се обезбеди втора, независна геометриска перспектива на деформациите на критичното подрачје. За анализата беа користени сите достапни снимки во периодот од октомври 2014 до февруари 2025 година, што овозможи конзистентна временска серија и споредливост со резултатите добиени од растечката орбита. На тој начин, се обезбедува покомплетна просторна интерпретација на поместувањата, која претставува основа за понатамошна декомпозиција на компонентите на движење. Основните карактеристики на користените *Sentinel-1* снимки за опаѓачката орбита се прикажани во Табела 4, додека анализираната површина од интерес е прикажана на Слика 77.

Табела 4 Основни карактеристики на користените Sentinel-1 снимки за анализа на урбаната зона од Скопската Колина (опаѓачка орбита)

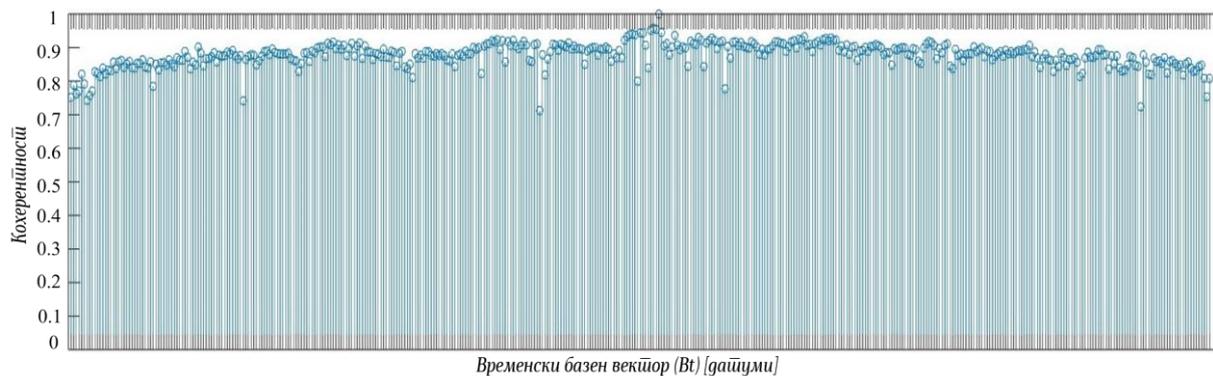
Број на SLC снимки	431
Анализиран временски период	Октомври 2014 - Февруари 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален пати	80
TOPS појас	IW 2
Агол на аквизиција (θ)	39.3°
Азимутален агол (α)	190.0°

Обработката на *Sentinel-1 SLC* снимките од опаѓачката (*descending*) орбита беше изведена со идентична методологија како и кај растечката орбита, во рамките на софтверот *SARPROZ*. За оваа анализа беше дефинирана примарната снимка, аквизирана на **27.10.2019 година**, во однос на која сите останати секундарни снимки беа корегистрирани и комбинирани за формирање на диференцијалните интерферограми.



Слика 77 Приказ на анализаната површина (AOI) за Скопската Копалина со *Sentinel-1* (*descending* снимки)

По извршените орбитални и топографски корекции, беше креирана целосната интерферометриска мрежа, врз основа на која се спроведе пресметка на индексот на амплитудна стабилност и селекција на стабилните расејувачи. Атмосферското моделирање (APS) беше извршено врз основа на мрежа од 3843 PS кандидати со индекс на стабилност поголем од 0.7, што овозможи сигурна инверзија и елиминација на атмосферските варијации. И во овој случај, резултатите од тестот на кохерентност укажуваат на висок степен на конзистентност во рамките на мрежата, што потврдува дека елиминацијата на атмосферската компонента во секоја од користените снимки е успешно спроведена (Слика 78).



Слика 78 Тест на определението APS за секоја користена снимка во анализата на урбаната зона на Скопската Копалина (*descending* дајасети)

Понатаму, беше спроведено просторно-временско моделирање на стабилните расејувачи со индекс на амплитудна стабилност над 0.6, при што беа идентификувани **35788 PS точки**, со просечна темпорална кохерентност од 0.85. За референтна точка беше избрана стабилна точка со 0.95 индекс на амплитудна стабилност, чии координати се прикажани во Табела 5.

Табела 5 Координати на референтната точка при PSInSAR анализата на урбаната зона на Скопската Котлина, со SAR снимките од оптачка орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
2118	426	41° 59' 49.46"	21° 25' 34.04"

На Слика 79 се прикажани резултатите од извршената PSInSAR анализа со користење на Sentinel-1 SAR снимките од оптачката орбита, кои ја прикажуваат просторната распределба и брзината на поместувањата во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина за периодот 2014–2025 година. Анализата покажува дека површината во најголемиот дел од градското подрачје е стабилна, со регистрирани поместувања во рамките на ± 1 mm/год, што е во согласност со вредностите добиени од растечката орбита. Сепак, во најјужниот дел на котлината, во рамките на нестабилната зона во населбата Припор, која беше идентификувана при анализата на растечката орбита, се забележува изразено издигнување на теренот во насока на правецот на аквизиција (LOS) од оптачката орбита, што е јасно евидентирано на сликата (маркирано со бела кружница).



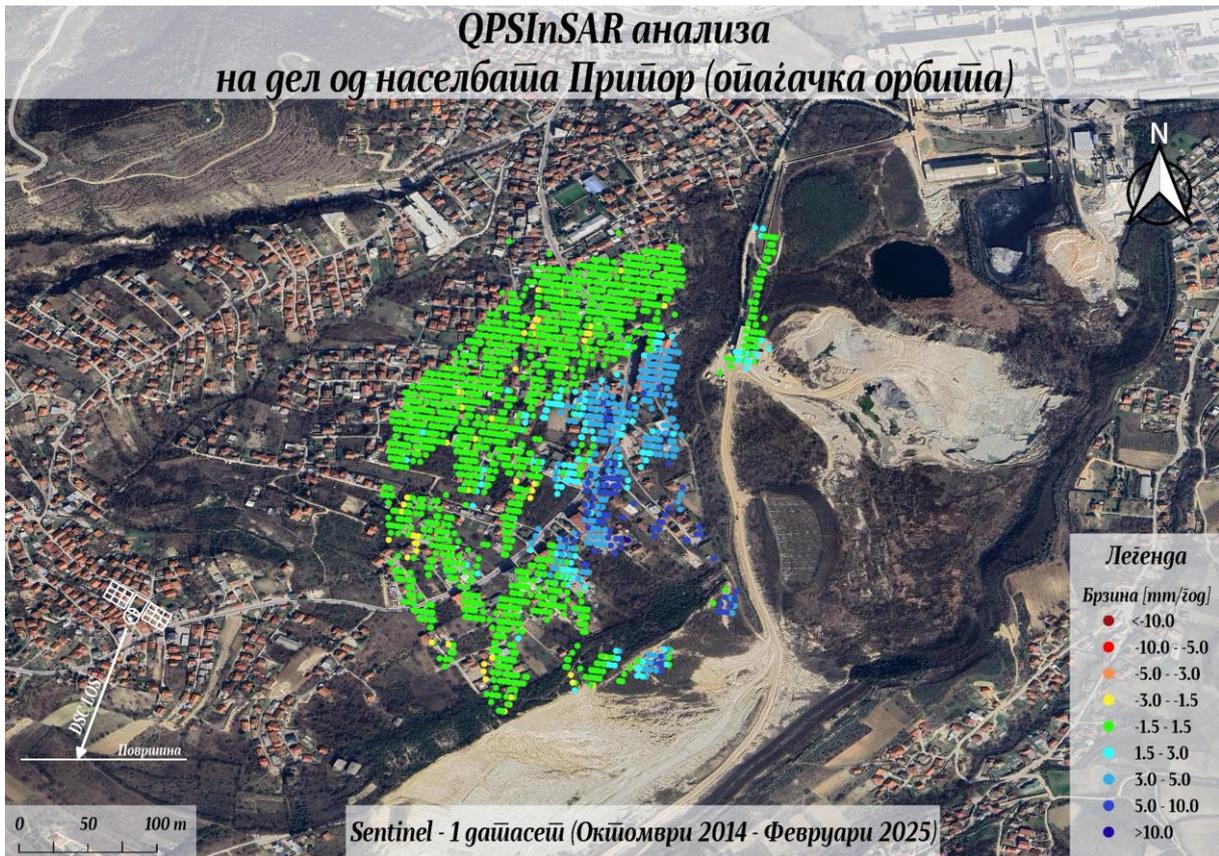
Слика 79 Просторна распределба на PS точки и брзини на поместување (mm/год) за урбаната зона на Скопската Котлина – оптачка орбита (Sentinel-1)

Дополнителната *PSInSAR* анализа се спроведе на сите точки во рамките на детектираната зона во населба Припор и при просторното – временско моделирање се идентификуваа вкупно **1379 PS точки** со темпорална кохерентност (γ) поголема од 0.6 и просечна вредност од 0.72. Резултатите, прикажани на *Слика 80*, откриваат изразено *LOS* издигнување во рамките на нестабилната зона, каде максималните кумулативни *LOS* поместувања достигнува до **9 cm** во правецот на аквизиција на опаѓачката орбита, а брзините на поместување кај повеќе точки надминуваат **7 mm/годишно**. Овие поместувања се регистрирани во истата просторна област која беше детектирана и при анализите со снимките од растечката орбита, но со спотивни предзнаци, што потврдува дека деформациските процеси се локално концентрирани и имаат сложен просторен карактер.



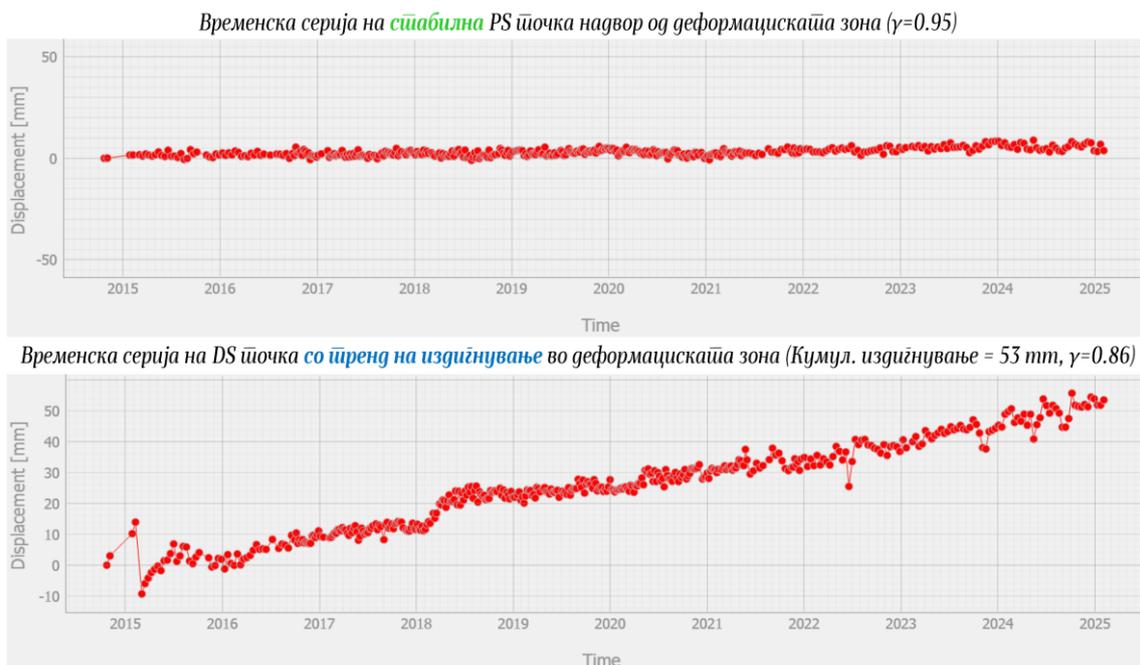
Слика 80 PSInSAR анализа за локално нестабилна зона од населба Припор, опаѓачка орбита (Sentinel-1)

За дополнителна потврда на резултатите и зголемена просторна прецизност на деформациските обрасци, беше спроведена и *QPSInSAR* анализа на истото локализирано подрачје. При оваа анализа беа идентификувани вкупно **2499 QPS точки** со темпорална кохерентност (γ) поголема од 0.7 и просечна вредност од 0.80. Резултатите, прикажани на *Слика 81*, потврдуваат постоење на истиот деформациски градиент детектиран со *PSInSAR* анализата, но со повисок степен на просторна деталност и подобрена репрезентација на микродеформациските обрасци. Максималните кумулативните издигнувања достигнуваат до **10 cm** во анализираниот период, а релативната брзина на повеќе точки надминува **9 mm/годишно**. Просечните *LOS* поместувања на сите точки во критичната зона е околу **6 cm** за анализираниот период. На прв поглед, регистрираното издигнување во насока на линијата на аквизиција (*LOS*) на опаѓачката орбита може да делува контрадикторно, но најверојатно е поврзано со доминантна хоризонтална компонента на поместување кон исток, што укажува на посложен деформациски механизам во оваа зона.



Слика 81 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона од населба Пријор, опаѓачка орбита (Sentinel-1)

На Слика 82 се прикажани временските серии на две точки, една PS точка од стабилната зона и една QPS точка од нестабилната зона, која укажува на издигнување на теренот во насока на правецот на аквизиција (LOS) на опаѓачката орбита.



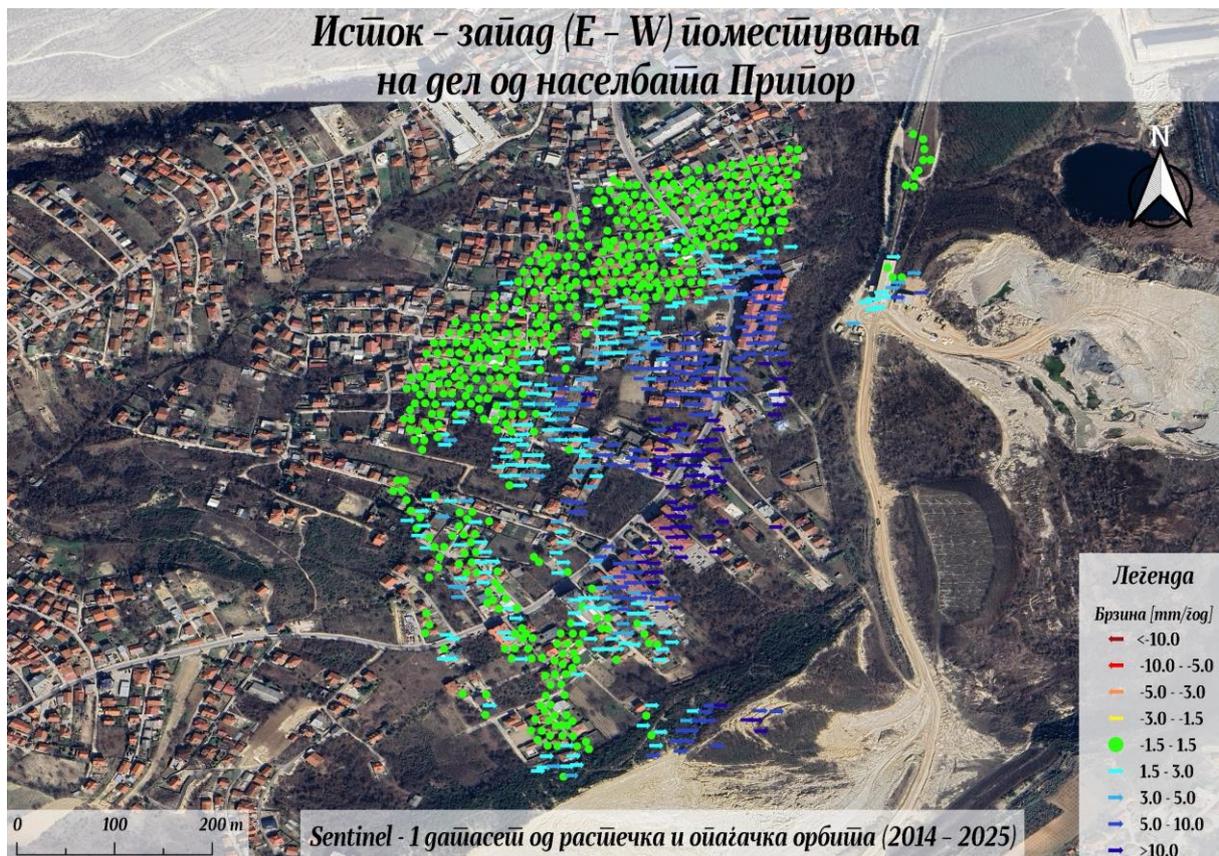
Слика 82 Приказ на временскијте серии на PS сџабилна тџочка и DS тџочка со тџренд на издигнување од InSAR анализиијте со Sentinel - 1 снимки од опаѓачка орбита

4.2.3 Декомпозиција на LOS поместувањата во вертикална и источно-западна компонента во рамките на нестабилната зона во населба Припор

Декомпозицијата на LOS поместувањата во источно-западна и вертикална компонента, претставува неопходен чекор при интерпретација на InSAR резултатите, особено во случаи кога анализите од растечката и опаѓачката орбита покажуваат различни трендови на деформација. Таквите разлики најчесто се јавуваат во подрачја со сложени теренска конфигурација, каде што комбинираното вертикално и хоризонтално движење на површината може да доведе до погрешни или ограничени интерпретации доколку се анализира само еден правец на аквизиција.

Во конкретниот случај со нестабилната зона во населбата Припор, InSAR анализите покажаа слегнување на теренот во растечката орбита и издигнување во опаѓачката орбита, што укажува на постоење на изразена хоризонтална компонента на движење. За да се добие реална просторна претстава за насоката и интензитетот на овие деформации, беше извршена декомпозиција на LOS поместувањата во вертикална и источно – западна компонента, користејќи ги резултатите од двете орбити. Процесот е реализиран во софтверот QGIS, преку специјално развиен плагин кој се темели на релацијата (66), каде со користење на агли на аквизиција и азимут од орбити, се пресметуваат вертикалната и источно-западната компонента на поместувањето.

На Слика 83 е прикажана источно-западната компонента од направената декомпозиција на InSAR анализите добиени од растечката и опаѓачката орбита, за нестабилната зона во населбата Припор, со што се добива појасна претстава за хоризонталните поместувања.

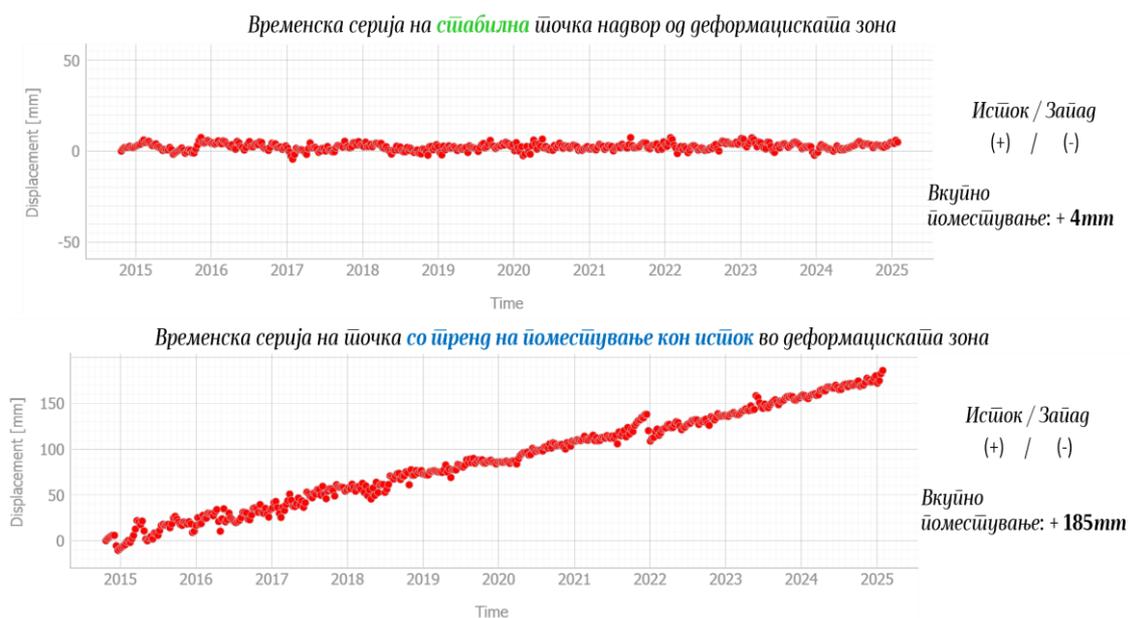


Слика 83 Приказ на источно – западната компонента од декомпозицијата на InSAR анализите на нестабилната зона во населба Припор

Резултатите од декомпозицијата на источно – западната компонента, прикажани на Слика 83, прикажуваат просторна распределба на хоризонталните поместувања во рамките на нестабилната зона во населбата Припор. Стрелките насочени кон десно означуваат поместувањата кон исток, а оние кон лево ги означуваат движењата кон запад. Боите на стрелките го претставуваат интензитетот на поместувањето, при што потемните нијанси укажуваат на поголеми вредности, а посветлите на помали движења. Зелените кружни маркери, претставуваат стабилни точки кај кои не се забележани значајни хоризонтални промени.

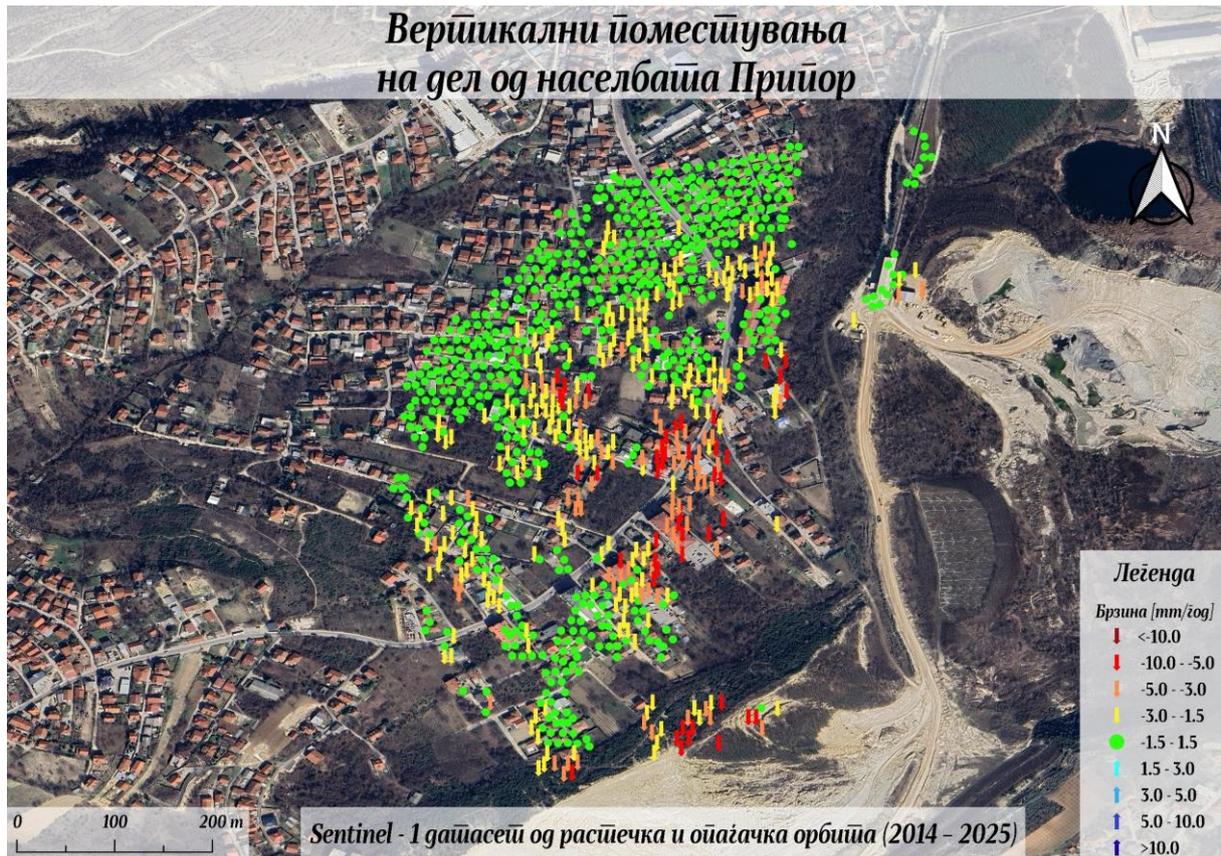
Анализата покажува дека сите детектирани хоризонтални поместувања во нестабилната зона се **насочени кон исток**, што е во согласност со резултатите добиени од двете орбити. Најголемите регистрирани хоризонтални поместувања во анализираниот десетгодишен период изнесуваат повеќе од **18 cm** кон исток, додека просечното поместување во рамките на целата зона кон исток е околу **8 cm**. Овие резултати укажуваат на долготраен процес на хоризонтално пролизгување на теренот, кое се одвива по благозакосената падина насочен кон цементарницата „Усје“ (Слика 75). Ваквиот деформациски тренд најверојатно е резултат на взаемно влијание на геомеханичките својства на подлогата и антропогените активности поврзани со долгогодишната експлоатација во околината на активните ископи, кои ја нарушуваат природната стабилност на падината и поттикнуваат постепени хоризонтални придвижувања.

Во продолжение, на Слика 84 се прикажани временските серии за стабилна точка и точка во деформациската зона со тренд на придвижување кон исток, со цел да се прикаже разликата во динамиката и интензитетот на хоризонталните (исток – запад) поместувања низ анализираниот временски период.



Слика 84 Приказ на временските серии на стабилна точка и точка со тренд на поместување, добиени од декомпозираната исток-запад компонента на движење

Резултатите од направената декомпозиција за вертикалната компонента на поместување се прикажани на Слика 85. Оваа анализа овозможува прецизно издвојување на вертикалните поместувања од вкупното тродимензионално движење, со што се добива појасна претстава за реалниот карактер на регистрираните промени во нестабилната зона.

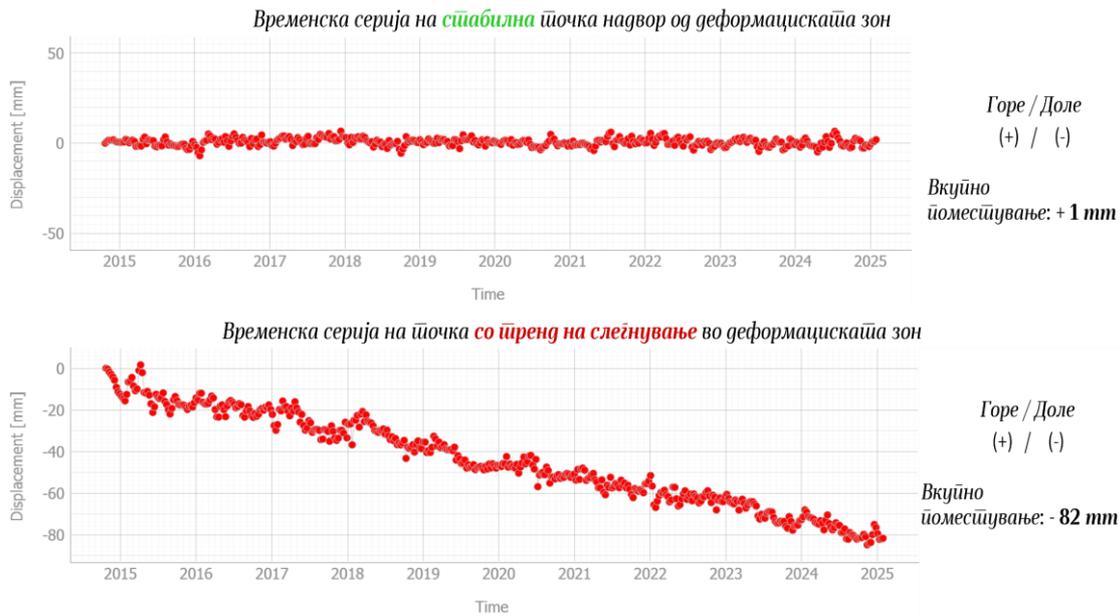


Слика 85 Приказ на вертикалните компоненти од декомпозицијата на InSAR анализите на нестабилната зона во населба Припор

Резултатите од декомпозицијата на вертикалната компонента, прикажани на Слика 85, ја прикажуваат просторната распределба на слегнувањата и издигнувањата во рамките на нестабилната зона во населбата Припор. Вертикалните поместувања се прикажани со обоена скала, каде потоплите нијанси (жолта до црвена) укажуваат на слегнување на теренот, додека постудените (светло сина до сина) претставуваат издигнување. Зелените кружни маркери, како и кај претходната анализа, ги означуваат стабилните точки, кај кои не се забележани значајни вертикални промени во анализираниот период.

Анализата укажува дека најголемите вертикални слегнувања надминуваат **-8 cm**, додека просечната вредност на слегнување во рамките на целата нестабилна зона изнесува околу **-4 cm** во анализираниот период (2014–2025). Распределбата на точките со негативни вредности е концентрирана по падината што се спушта кон активните ископи на цементарницата, што укажува на континуиран процес на локално слегнување на теренот. Во комбинација со источното насочување на хоризонталната компонента, резултатите потврдуваат дека деформациите се резултат на комбинирано вертикално и хоризонтално придвижување на падината над цементарницата „Усје“, што укажува на постепено нарушување на стабилноста на овој локален теренски сегмент.

Во продолжение, на Слика 86 се прикажани временските серии за стабилна точка и точка во деформационската зона со тренд на слегнување, со цел да се прикаже разликата во динамиката и интензитетот на вертикалните поместувања низ анализираниот временски период.



Слика 86 Приказ на временските серии на стабилна тачка и тачка со тренд на поместување, добиени од декомпозираната вертикална компонента на движење

4.2.4 InSAR анализа со TerraSAR-X снимки на урбаната зона на Скопската Котлина

Во рамките на истражувањето на урбаната зона на Скопската Котлина, покрај Sentinel-1 снимките, беа искористени и SAR снимките од TerraSAR-X, која претставува X-band ($\lambda = 3.1 \text{ cm}$) SAR мисија со висока просторна прецизност, управувана од Германската вселенска агенција (DLR) во соработка со Airbus Defence and Space. За разлика од Sentinel-1, кој обезбедува глобална и континуирана покриеност на SAR снимки, TerraSAR-X е комерцијална мисија со ограничена просторна достапност, но со значително повисока просторна деталност, при што резолуцијата во StripMap режимот изнесува околу 3 m во range и azimuth насока. Овие карактеристики ја прават особено погодна за прецизни локални анализи на деформации во урбани подрачја, каде што е потребно да се регистрираат мали промени.

Бидејќи TerraSAR-X претставува комерцијална сателитска мисија, пристапот до нејзините податоци се обезбедува преку авторизирана нарачка за што е потребна финансиска компензација за секоја снимка. Согласно тековната политика за дистрибуција на податоците, една поединечна SLC снимка има приближна вредност од околу 200 евра, зависно од режимот на снимање и големината на опфатот. Поради тоа, користењето на оваа мисија за пошироки истражувања е ограничено и најчесто се насочува кон специфични, локални анализи.

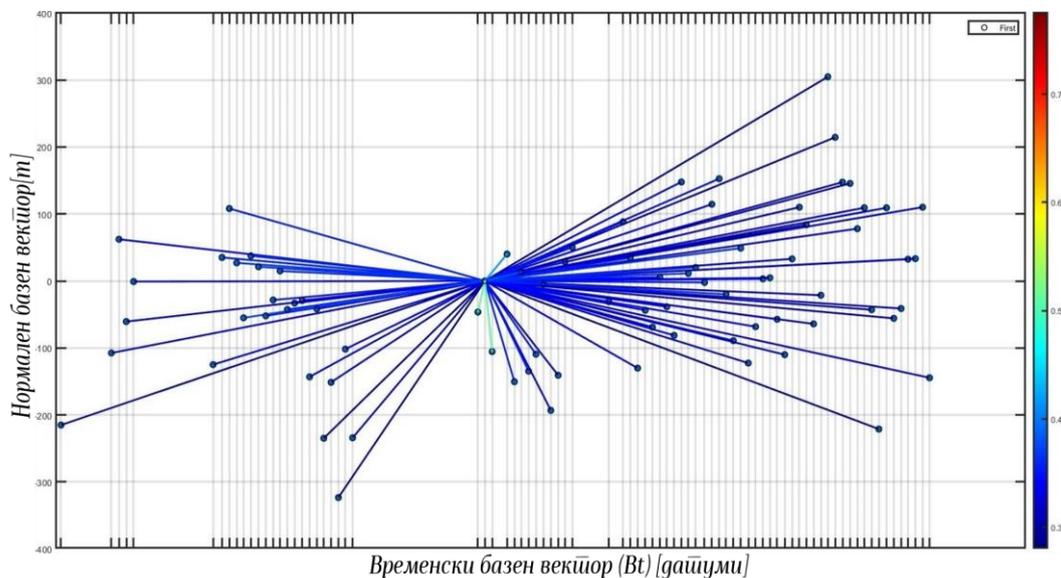
Сепак, во рамките на програмата на DLR за научни истражувања, овозможен е бесплатен пристап до архивски TerraSAR-X податоци постари од 18 месеци, наменети за академски и истражувачки цели. Согласно оваа програма, беше поднесено и одобрено барање за пристап до архивските снимки што ја покриваат урбаната зона на Скопската Котлина. На тој начин беа обезбедени сите достапни снимки, вкупно 82 SLC снимки, во периодот од јули 2020 до февруари 2024 година, сите од растечката (ascending) орбита, снимени во StripMap режим и со HH поларизација. Податоците беа прибавени преку D-SDA/EOWEB геопорталот, официјалниот систем за дистрибуција на податоци на DLR и послужија како основа за напредна интерферометриска анализа со повисок просторен степен на деталност.

Основните карактеристики на користените TerraSAR-X снимки се прикажани во Табела 6.

Табела 6 Основни карактеристики на користените TerraSAR - X снимки за анализа на урбаната зона од Скопската Колина (расипечка орбита)

Број на SLC снимки	82
Анализиран временски период	Јули 2020 - Февруари 2024
Поларизација	HH
Број на орбитален пати	161
Режим на снимање	StripMap
Агол на аквизиција (θ)	35.3°
Азимутален агол (α)	349.7°

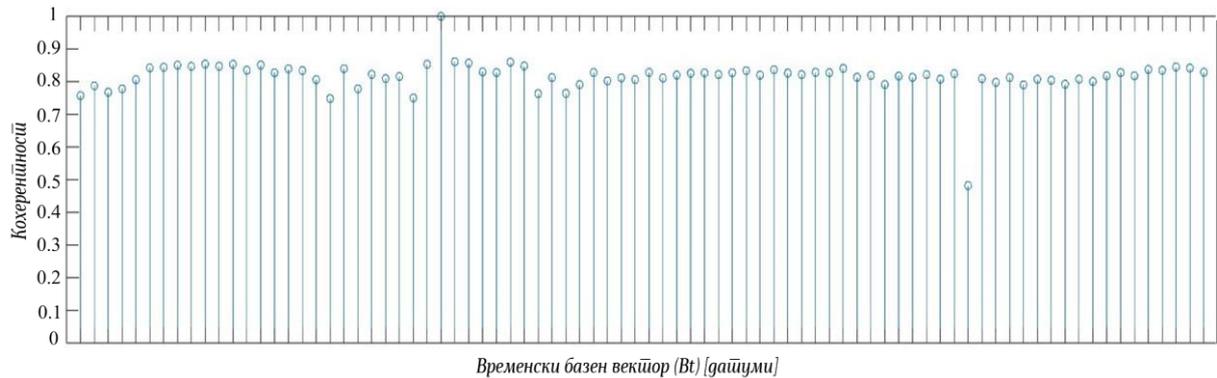
За обработката на TerraSAR-X снимките за целата површина на урбаната зона од Скопската Колина најпрво беше применета *PSInSAR* анализа во софтверот *SARPROZ*, при што беше креирана интерферометриска мрежа со референтна снимка аквизирана на **08.04.2022 година**. Сите останати секундарни снимки беа корегистрирани во однос на оваа референтна снимка, по што беа генерирани диференцијални интерферограми со цел да се обезбеди висока просторна кохерентност и временска стабилност на податоците. Конфигурацијата на интерферограмите е претставена со *STAR* графикот, прикажан на Слика 87, кој ја илустрира интерферометриската поврзаност меѓу сите снимки и ја претставува основата за понатамошната *PSInSAR* обработка.



Слика 87 STAR график за *PSInSAR* анализа за урбаната зона на Скопската Колина со TerraSAR - X снимки од расипечка орбита

По креирањето на интерферометриската мрежа, беа изведени сите неопходни прелиминарни чекори за подготовка на податоците пред фазната анализа, во согласност со постапката применета и кај претходните *InSAR* анализи. Тие вклучуваа орбитални и топографски корекции, елиминација на „earth-flat“ компонентата и дефинирање на контролна точка за прецизно геокодирање на снимките во *WGS 84* координатен систем.

Во рамките на APS анализата беа вклучени вкупно 4 737 PS кандидати со индекс на амплитудна стабилност поголем од 0.8, што овозможи висока сигурност при инверзијата и проценката на атмосферската компонента. Резултатите од APS тестот за кохерентност, прикажан на Слика 88, укажува на стабилни и конзистентни вредности низ целиот сет снимки, што потврдува дека елиминацијата на атмосферските варијации е успешно реализирана и дека интерфероетриските фазни вредности се соодветни за понатамошно просторно-временско моделирање.



Слика 88 Тест на определеније APS за секоја користена снимка во анализата со користење на TerraSAR - X снимки на урбаната зона на Скопската Колина (ascending дајџеј)

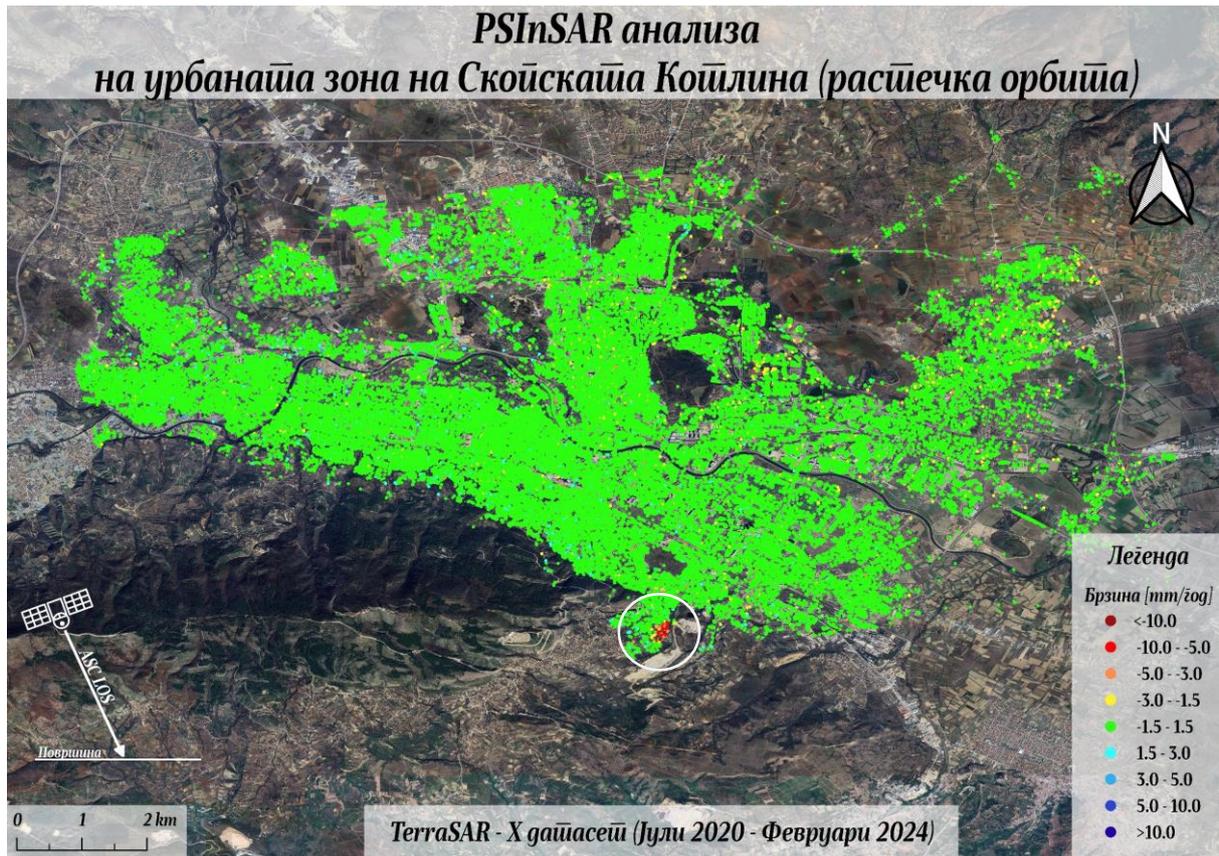
По финалната проценка на атмосферската компонента за секоја снимка, беше извршен завршниот чекор на обработката, односно просторното - временско моделирање на PS точките. Селекцијата на точките беше спроведена врз основа на индекс на амплитудна стабилност поголем од 0.55, при што беа во моделирањето вклучени вкупно 100626 PS точки во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина. Високата рефлективност на урбаните структури, инфраструктурните објекти и покривните површини придонесе за висока просторна густина на стабилни расејувачи, што овозможи анализа базирана исклучиво на PSInSAR пристап, без потреба од дополнителни DS техники. За референтна точка беше избрана стабилна локација со индекс на амплитудна стабилност од 0.95, чии координати се прикажани во Табела 7.

Табела 7 Координати на референтната точка при PSInSAR анализата на урбаната зона на Скопската Колина, со TerraSAR - X снимките од растечката орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
327	523	41° 58' 03.41"	21° 27' 00.39"

Врз основа на дефинираната референтна точка беа пресметани релативните брзини на поместување за сите PS точки вклучени во просторното - временско моделирање. Во рамките на анализата беа детектирани вкупно 92971 PS точки со временска кохерентност (γ) поголема од 0.6, при што просечната вредност на временската кохерентност за целата мрежа изнесува 0.86, што укажува на висока конзистентност и сигурност на резултатите. Добиените податоци ја прикажуваат просторната распределба и динамиката на поместувањата во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина, анализирани врз основа на TerraSAR-X снимките од растечката орбита.

Резултатите од извршената PSInSAR анализата на урбаната зона од Скопската Котлина се прикажани на Слика 89.



Слика 89 Просјорна распределба на PS точки и брзини на поместување (mm/год) за урбаната зона на Скопската Котлина – оидачка орбита (TerraSAR - X)

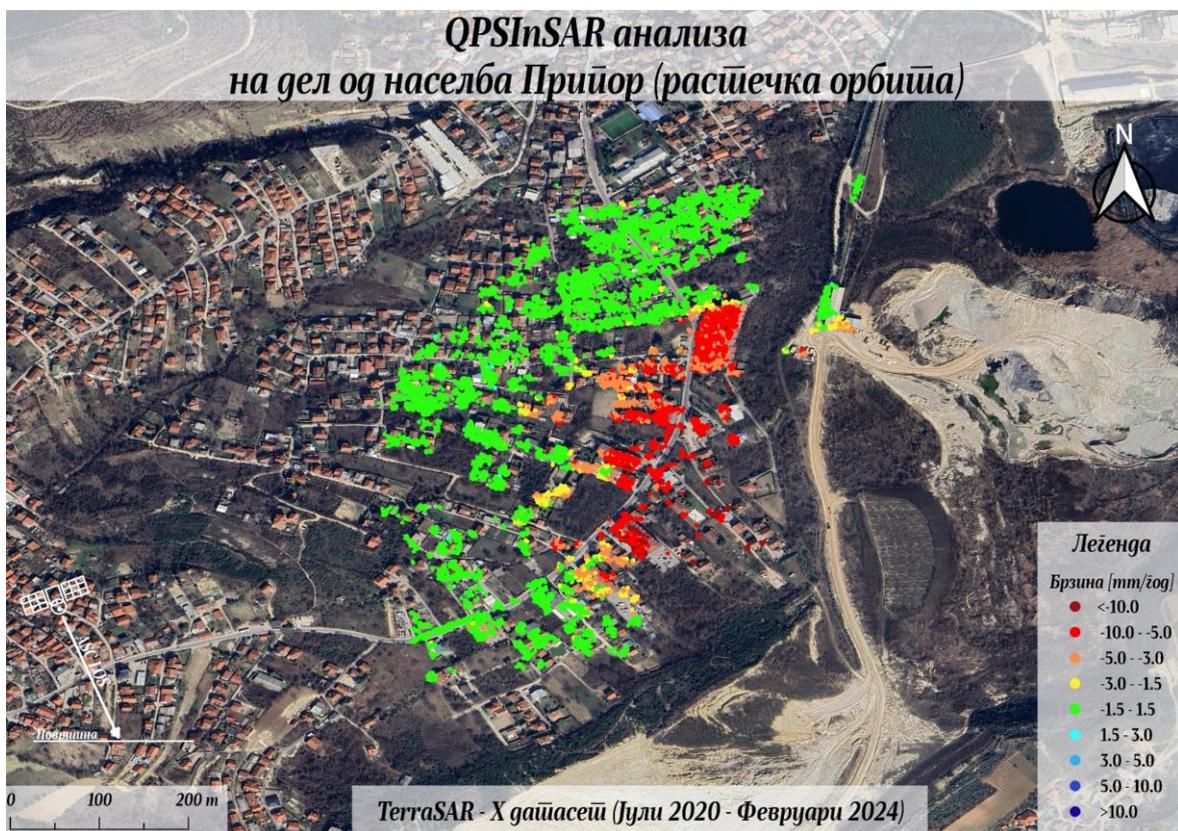
Резултатите прикажани на Слика 89 од извршената PSInSAR анализа со користење на TerraSAR-X снимките од растечката орбита укажуваат на доминантно стабилна состојба на теренот во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина. Речиси целата површина прикажува минимални варијации на поместување, главно во границите од ± 1 mm/год, што е во согласност со резултатите добиени од Sentinel-1 снимките за истата орбитална насока. Ваквата конзистентност меѓу двата сателитски системи претставува важна потврда за доверливоста на извршената анализа и за стабилниот карактер на поголемиот дел од котлината.

Сепак, во јужниот дел, во рамките на населбата Припор, повторно се забележува зона со изразени деформациски тренд (на Слика 89 маркирана со бела кружница), кои корелираат со нестабилната област детектирана и со InSAR анализите на Sentinel-1 снимките. Овој сегмент се издвојува како локална аномалија во однос на општата стабилност на теренот и претставува простор од посебен интерес за детална анализа и споредбена проценка на резултатите од двете сателитски мисии.

Како и во претходните анализи и во овој случај беа спроведени детални InSAR анализи на критичната зона во населбата Припор со примена на PS и DS пристапите, со цел попрецизно да се дефинираат деформациските обрасци. Овој комбиниран пристап овозможи истовремено да се опфатат и стабилните и помалку кохерентни површини, што придонесе за покомплетна интерпретација на резултатите. Резултатите од PSInSAR анализата се прикажани на Слика 90, а оние од QPSInSAR анализата на Слика 91.



Слика 90 PSInSAR анализа за локално несџабилна зона од населба Пријор, расипечка орбита (TerraSAR - X)

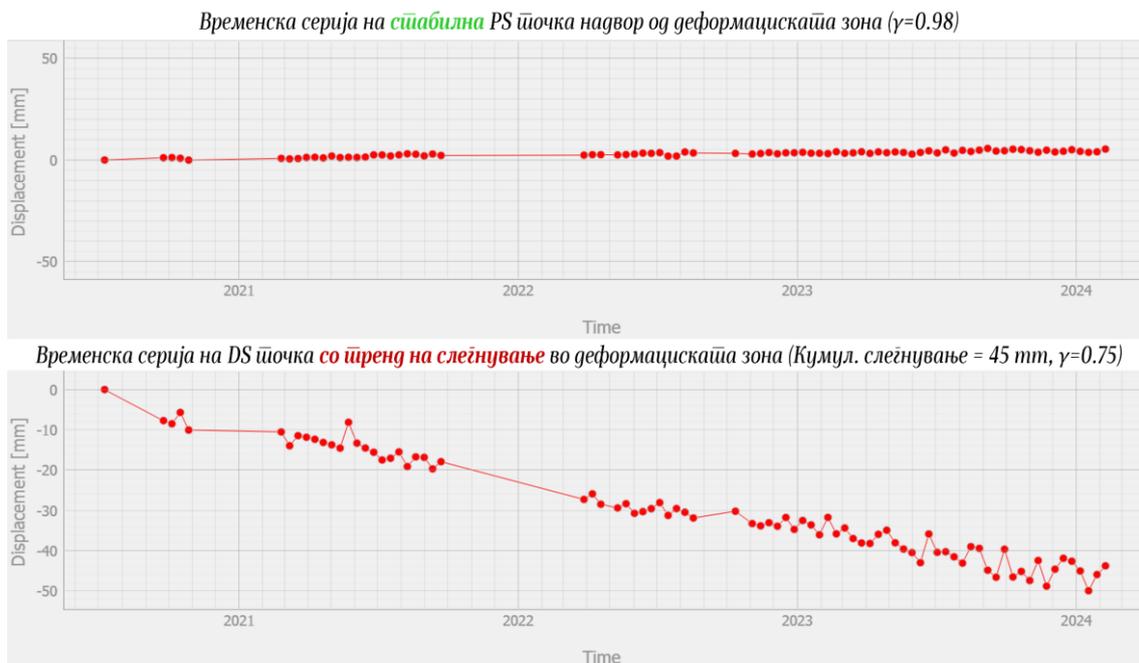


Слика 91 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона од населба Пријор, расипечка орбита (TerraSAR - X)

Резултатите од деталната *PSInSAR* анализата на критичната зона во населбата Припор (Слика 90) покажуваат јасно изразен локален деформациски тренд. Вкупно беа детектирани **3146 PS точки** со темпорална кохерентност (γ) поголема од 0.7 и просечна вредност од 0.87, што укажува на висок степен на стабилност на временската серија. Анализата покажува дека релативната брзина на поместување во поединечни точки надминува **-13 mm/годишно**, додека максималното кумулативно слегнување во анализираниот период (нешто помалку од 4 години) изнесува повеќе од **-4 cm** во правецот на аквизиција на растечката орбита.

Резултатите од *QPSInSAR* анализата на истата критична зона во населбата Припор (Слика 91) овозможуваат подетално согледување на карактерот и интензитетот на сегменталните слегнувања на теренот. Вкупно беа детектирани **12063 QPS точки** со темпорална кохерентност (γ) поголема од 0.7 и просечна вредност од 0.82, што укажува на висок степен на стабилност и прецизност на временската серија. Анализата покажува дека максималните кумулативни *LOS* слегнување во поединечни точки достигнува до **-5 cm**, додека максималната релативна брзина на поместување достигнува до **-14 mm/годишно**, што укажува на континуиран процес на слегнување на теренот во насоката на аквизиција на растечката орбита. Просечните *LOS* поместувања на сите точки од критичната зона изнесува околу **-3.5 cm** за анализираниот период. Како и кај *PSInSAR* резултатите, идентичната нестабилна зона е потврдена и со *QPSInSAR* техниката, што дополнително ја зацврстува доверливоста и конзистентноста на резултатите. Особено значајно е што истата нестабилна зона, претходно идентификувана со *Sentinel-1* податоците од растечка орбита, е повторно потврдена и со *TerraSAR-X* снимките, што недвосмислено укажува на висока конзистентност и сигурност на резултатите добиени од различни фреквентни опсежи.

На Слика 92 се прикажани временските серии на две точки, од кои една е лоцирана во стабилниот дел, а другата во нестабилниот дел од зоната во населба Припор. Овој приказ овозможува споредба на деформациското однесување помеѓу двете области и јасна визуелизација на разликата во трендовите на поместување низ анализираниот временски период.



Слика 92 Приказ на временските серии на *PS* стабилна точка и *DS* точка со тренд на слегнување од *InSAR* анализите со *TerraSAR-X* снимките од растечка орбита

4.2.5 Дискусија на резултатите од InSAR анализите на урбаната зона на Скопската Котлина

Резултатите од повеќегодишниот InSAR мониторинг врз основа на *Sentinel-1* податоци од растечка и опаѓачка орбита и *TerraSAR-X* снимки во растечка орбита говорат за доминантно стабилна состојба во рамките на урбаната зона на Скопската Котлина, со регистрирани брзини на поместувања во границите од $\pm 1 \text{ mm/годишно}$, за најголемиот дел од површината. Овој заклучок е конзистентен помеѓу сателитски системи со *C-band* и *X-band*, што ја зголемува доверливоста на определените деформациски трендови (Слика 72, Слика 79 и Слика 89).

И покрај општата стабилност, анализите едногласно издвојуваат локална нестабилна зона во населба Припор, над активните ископи на цементарницата „Усје“. Во растечката орбита се регистрирани изразени *LOS* слегнување во правецот на аквизиција, додека во опаѓачката орбита се забележуваат *LOS* поместувања со спротивен предзнак, односно издигнување во правецот на аквизиција. Оваа наизглед контрадикторна слика е геометриски очекувана кога реалното движење вклучува силна хоризонтална компонента на поместување.

Споредбата меѓу *Sentinel-1 (C-band)* и *TerraSAR-X (X-band)* во растечката орбита потврдува висока меѓусензорска конзистентност на детектираните деформациски трендови. И покрај пократкиот временски опфат на *TerraSAR-X* и различната просторна резолуција, двата сензора идентификуваат иста просторна аномалија со слична геометрија на деформациското поле. Со *Sentinel-1* се добиени просечни кумулативни *LOS* поместувања во растечка орбита на критичната зона од околу -9 cm за анализираниот десетгодишен период (2014–2025), додека со *TerraSAR-X* (Јуни 2020–Февруари 2024), за период пократок од четири години, се регистрирани просечни кумулативни *LOS* поместувања од околу -3.5 cm , што укажува на одлична согласност на резултатите од овие две независни InSAR анализи. Поради повисоката просторна резолуција, *X-band* снимките овозможуваат поголем број перманентни расејувачи и подобра деталност во урбаните зони, додека *C-band* снимките нудат долга и континуирана временска серија, погодна за анализа на долгорочни деформациски процеси.

Декомпозицијата на InSAR резултатите од двете орбити, со процесирани *Sentinel - 1* снимки, на источно-западна и вертикална компонента (Слика 83 и Слика 85) обезбедува квантитативна и физички интерпретабилна репрезентација на движењето:

- Исток-западната компонента покажува **хоризонтално поместување кон исток** кое достигнува до **18 cm** на поединечни точки и просечно придвижување кон исток на сите точки од деформациската зона од **8 cm** во анализираниот период (2014–2025);
- Вертикалната компонента покажува **слегнување на критичната зона** кое достигнува до **-8 cm** на поединечни точки и просечно слегнување на сите точки од деформациската зона од **-4 cm** во анализираниот период (2014–2025);

Комбинацијата од хоризонтално поместување на критичната зона кон исток и вертикално слегнување упатува на постепено придвижување по благозакосена падина над ископите од цементарницата “Усје” (3D приказ на Слика 75). Временските серии се доминантно линеарни со висока темпорална кохерентност, при што *PS* точките во критичната зона типично имаат $\gamma \approx 0.70$ – 0.90 , а *QPSInSAR* ја зголемува густината на мерењето неколкупати во однос на *PS* (на пример од ≈ 1.2 – 1.4 илјади на ≈ 2.5 – 3.5 илјади точки по орбитална геометрија), што овозможува подетални

прикази на просторните градиенти и разликување на микролокации со засилена активност. Ваквиот пристап е особено корисен при анализа на урбани и индустриски зони каде мали просторни разлики можат да укажат на различен механизам на деформација. Сепак, ваквата предност е придружена со значително поголеми процесирачки барања. *QPSInSAR* подразбира анализа на многу поголем број интерферограми и сложени просторно - временски модели, поради што потребната хардверска моќ и времето на обработка се повеќекратно поголеми во однос на стандардниот *PS* пристап. Затоа оваа техника може да се смета за временески и хардверски нерационална за анализа на големи територии. Од друга страна, нејзината примена е оправдата за помали, локално ограничени подрачја, каде што постои реална можност за идентификација на *DS* точки и појасно и подетално да се дефинираат локалните деформациски обрасци.

Покрај високата конзистентност на добиените резултати, едно од клучните ограничувања на спроведените *InSAR* анализи е недостигот на доверливи расејувачи во вегетираните површини, особено во рамките на периферните делови од анализираната зона и делумно во урбаните сегменти на Скопската Котлина. Ова се должи на фактот што *C-band* сигналите на *Sentinel-1*, со бранова должина од 5.6 cm, се чувствителни на промените во вегетацијата, која предизвикува декохерентност и го ограничува бројот на стабилни *PS* точки. Слична појава се забележува и кај *X-band* снимките од *TerraSAR-X*, каде пократката бранова должина дополнително ја зголемува чувствителноста на површински промени и атмосферски флуктуации. Овој недостаток може да се надмине со примена на *L-band* снимки ($\lambda \approx 24$ cm), кои обезбедуваат подобра пенетрација низ вегетацијата и повисока кохерентност над зелените површини. Таквиот пристап ќе овозможи пошироко покривање и повеќе стабилни точки, особено со вклучување на новите податоци од *NISAR* мисијата, која со својот 12-дневен циклус и глобална покриеност ќе придонесе за значително подобрен квалитет на идните *InSAR* анализи.

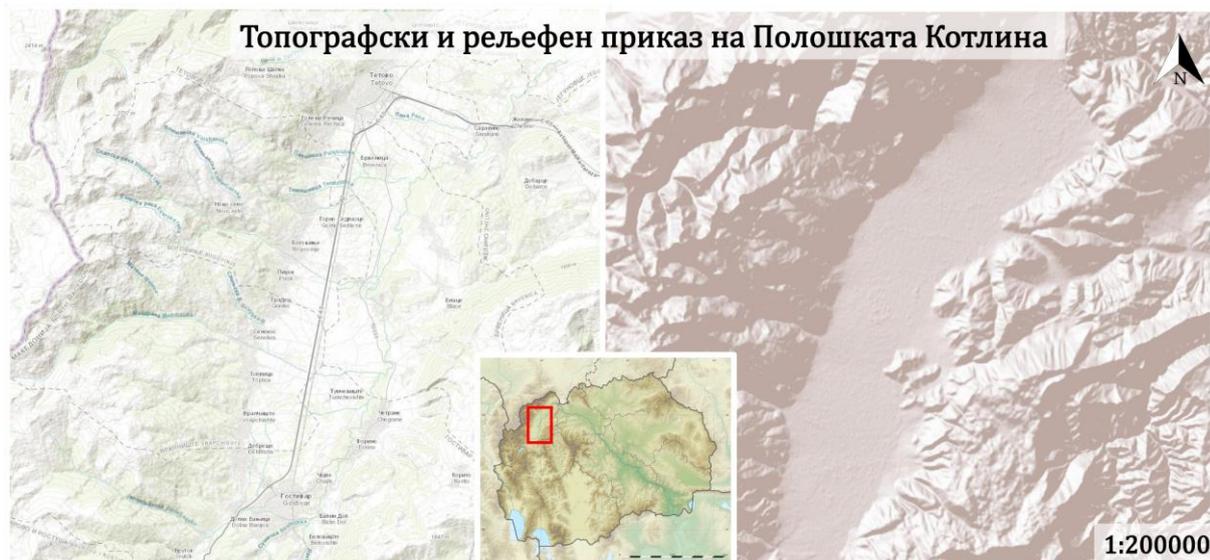
Покрај тоа, како забелешка треба да се напомене временската серија на *TerraSAR-X* снимките, која беше ограничена во периодот од 2020 до 2024 година и притоа со неправилна временска распределба и појава на празнини во датасетот. Иако ваквата неправилност може да претставува ограничување за временска анализа, во конкретниот случај немаше алтернативна можност, бидејќи овие снимки претставуваат единствен достапен *X-band* сет за територијата на Скопската Котлина. Сепак, и покрај овие ограничувања, резултатите добиени од *TerraSAR-X* покажаа одлична согласност со оние од *Sentinel-1*, што дополнително ја потврдува нивната аналитичка вредност.

Во целина, спроведените *InSAR* анализи овозможува ретроспективно и просторно целосно оценување на стабилноста на урбаната зона на Скопската Котлина за анализираниот десетгодишен период. Со користење на деталните временски серии од *Sentinel-1* и високо-резулционите *TerraSAR-X* снимки за споредба, добиени се детални деформациски обрасци за целата котлина, што е практично неизводливо со класични геодетски теренски методи. *InSAR* методологијата овозможи да се регистрираат субсантиметарски поместувања со висока просторна и временска прецизност, а со тоа и сигурна детекција на критични зони на потенцијална нестабилност. Најзначаен резултат од ова истражување е детекцијата на локализираната деформациска зона во населбата Припор, каде со висока доверливост се потврдени комбинирани вертикални и хоризонтални придвижувања на теренот. Овие резултати претставуваат вредна основа за воспоставување на систем за геодетски мониторинг на ова подрачје, со цел превентивно делување и навремено управување со потенцијалните ризици.

4.3 МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИ ВО ПОЛОШКАТА КОТЛИНА И НЕЈЗИНАТА ПЛАНИНСКА ОКОЛИНА

4.3.1 Карактеристики на Полошката Котлина и нејзината планинска околина

Полошката Котлина е сместена во северозападниот дел на Република С. Македонија и претставува долина опкружена со планински масиви и планини кои ја ограничуваат од сите страни. Котлината е ориентирана север – југ со просечна надморска височина помеѓу 400 и 600 m, додека околните ридови и планини се искачуваат над 1500 до 2000 m (Шар Планина, Бистра, Жеден) [78].



Слика 93 Топографски (лево) и релјефен (десно) прикази на Полошката Котлина

Морфолошки, котлината се одликува со изразено рамничарски централен дел, кој постепено преминува во периферни наклони и падини што се издигнуваат кон околните планински венци. Низ централниот дел на котлината тече реката Вардар, која ја формира најниската хидрографска оска и го обликува дренажниот систем на подрачјето. Овие косини се подложни на интензивни геоморфолошки процеси како ерозија, површинско истекување и земјини движења.

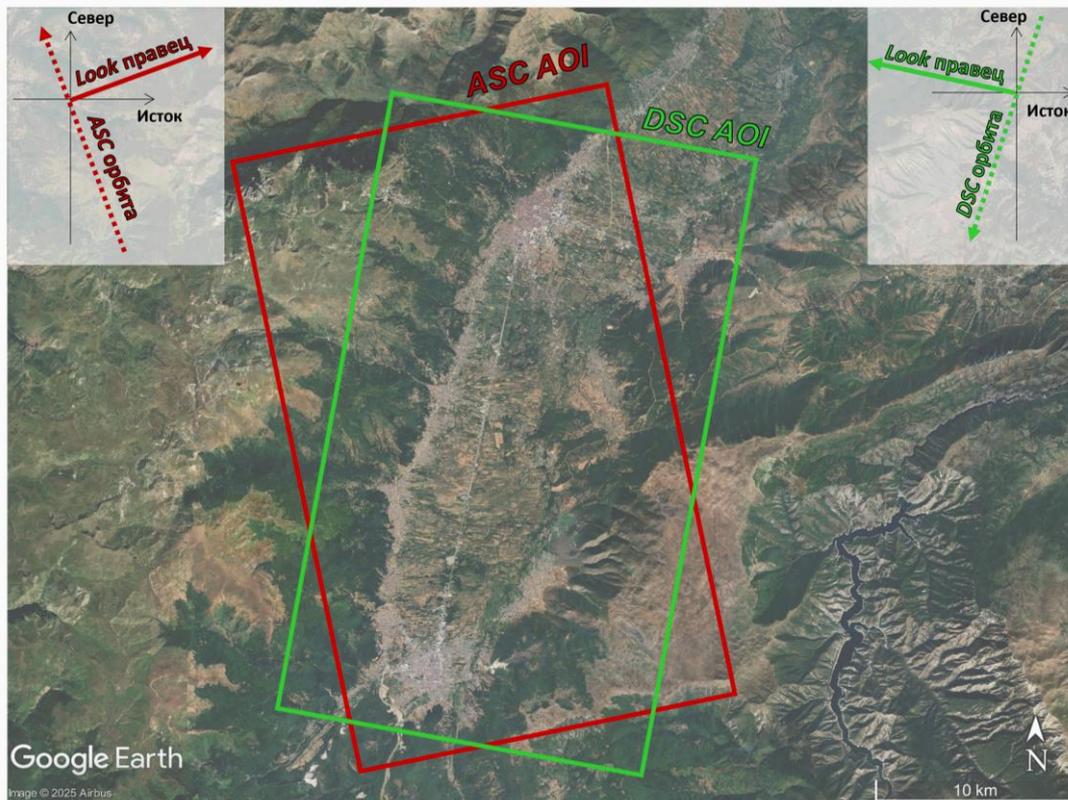
Од геолошки аспект, Полошката Котлина претставува неотектонска депресија исполнета со кватернарни алувијални, делувијални и пролувијални наноси. Овие седименти почиваат врз постари палеозојски и мезозојски карпи кои ја градат подлогата и околните ридско-планински предели. Во повисоките делови доминираат седиментни, метаморфни и локално вулканогени карпи, што укажува на сложена геолошка еволуција и тектонска активност на регионот. [17]

Полошкиот регион е познат по својата геолошка и морфолошка сложеност, која заедно со типичните климатски и хидролошки фактори ја прави оваа област изложна на земјини придвижувања и нестабилности. Во рамките на котлината се наоѓаат урбаните центри Гостивар и Тетово, како и бројни населени места со рурален карактер, од кои голем дел се сместени по падините и подножјата на околните планини. Ваквата положба, во комбинација со наклонет терен и нестабилни геолошки материјали, создава поволни услови за појава на пролизгувања и други типови на земјини движења.

Со оглед на овие морфолошки и геодинамички услови, Полошката Котлина и нејзината поширока планинска околина претставуваат особено погодна област за примена на InSAR техниките, кои овозможуваат прецизно и континуирано следење на деформациите. Ваквиот пристап претставува ефективен инструмент за навремена идентификација на подрачја со зголемен ризик и за процена на нивната стабилност во рамничарските и планински средини.

4.3.2 Користени податоци за InSAR анализите за Полошката Котлина и нејзината планинска околина

За потребите на InSAR анализите на Полошката Котлина и нејзината поширока планинска околина (делови од Шар Планина и Сува Гора) беа користени *Sentinel-1 SLC* податоци во *Interferometric Wide Swath* режим. Притоа беа опфатени сите достапни SAR снимки од растечката и опаѓачката орбита во периодот од октомври 2014 до јуни 2025 година, што овозможува долгорочна временска конзистентност и доволна густина на аквизиции за анализа на стабилноста на теренот. Просторниот опфат на анализираната област, со приказ на зоните покриени од растечката и опаѓачката орбита, е прикажан на Слика 94.



Слика 94 Приказ на анализираниите површини (AOI) во Полошката Котлина со Sentinel-1 во двете орбити

Sentinel-1 снимките беа преземени преку *Alaska Satellite Facility - Vertex* порталот со користење на специјално прилагодена *Python* скрипта, која овозможува автоматизирано симнување исклучиво на снимките што ги задоволуваат потребните интерферометриски услови (орбитален пат, поларизација VV и појас). На тој начин се обезбеди доследност во геометриската конфигурација и временската покриеност на целата котлина и нејзината планинска околина.

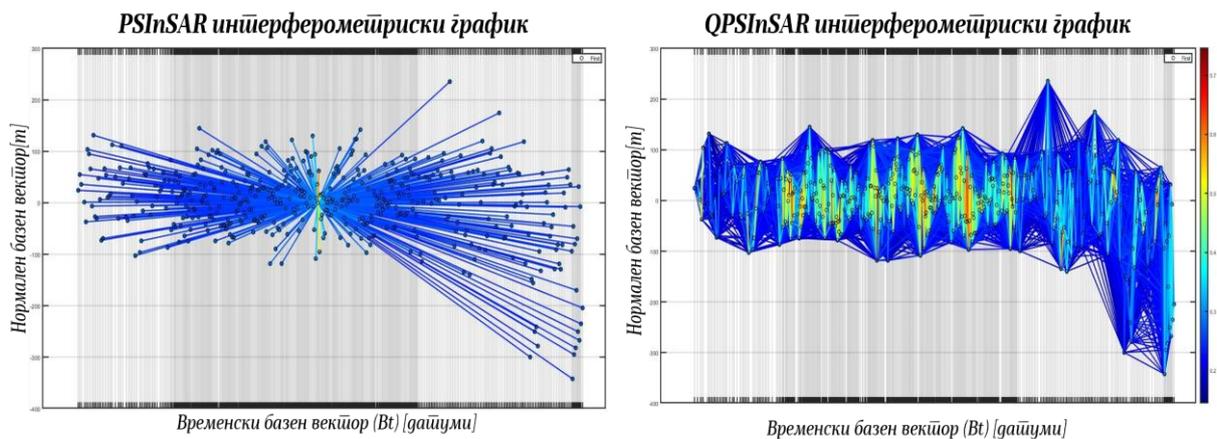
4.3.3 InSAR анализи на Полошката Котлина и нејзината планинска околина со Sentinel-1 снимки од растечка (ascending) орбита

Основните карактеристики на искористените SAR снимки од растечката (ascending) орбита се прикажани во Табела 8.

Табела 8 Основни карактеристики на користените Sentinel-1 снимки за InSAR анализите на Полошката Котлина (растечка орбита)

Број на SLC снимки	455
Анализиран временски период	Октомври 2014 – Јуни 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален пати	175
TOPS појас	IW 2
Агол на аквизиција (θ)	39.2°
Азимутален агол (α)	350.0°

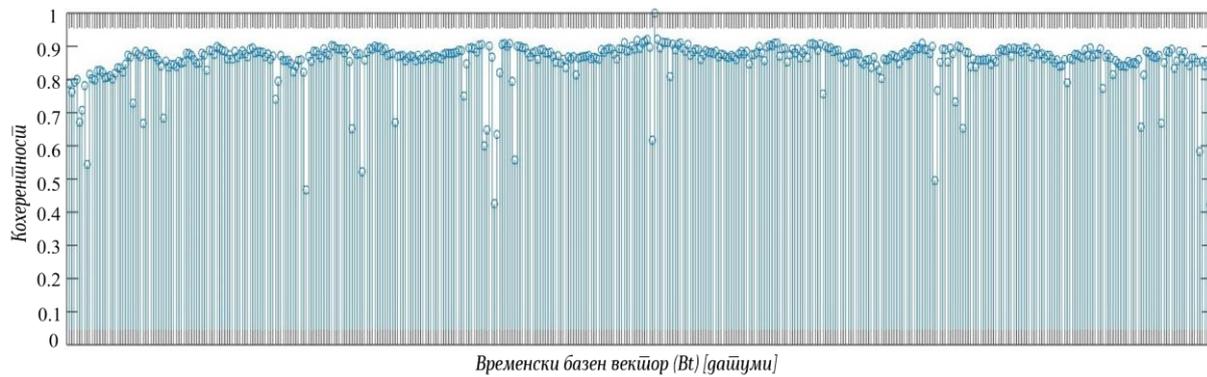
Во рамките на анализата беше дефинирана примарна SAR снимка од **04.11.2019 година**, во однос на која сите останати снимки беа корегистрирани со цел формирање на диференцијалните интерферограми. Структурата на интерферометриските мрежи, користени при PSInSAR и QPSInSAR анализите со снимки од растечка орбита се прикажана на Слика 95.



Слика 95 STAR график за PSInSAR (лево) и модифициран целосен график за QPSInSAR (десно) анализа

По создавањето на интерферометриските мрежи, следуваа низа на прелиминарни чекори за елиминација на орбиталната и топографската компонента и пресметка на индексот на амплитудна стабилност за секој пиксел. PSInSAR анализата беше иницијално спроведена за идентификација на стабилните расејувачи и за моделирање на атмосферската фазна компонента (APS). За селекција на PS кандидатите беше применет комбиниран параметар на амплитудна стабилност и просторна кохерентност со гранична вредност поголема од 1.60. На тој начин беа издвоени 2230 PS кандидати со стабилни радиометриски и фазни карактеристики, кои послужија за елиминација на APS компонентата.

Слика 96 ги прикажува резултатите од тестот на кохерентноста по отстранување на APS за секоја снимка.



Слика 96 Тести на определеније APS за секоја користена снимка во анализата со користење на Sentinel – 1 снимки во Полошката Колина (ascending дајчуми)

Просторно–временското моделирање беше спроведено врз основа на мрежа од PS точки со индекс на амплитудна стабилност поголем од 0.55. Во рамките на ова моделирање беа идентификувани вкупно **22507 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.83, што укажува на висока сигурност и конзистентност на добиените фазни вредности низ целата временска серија. Како референтна точка беше избрана стабилна PS точка чии индекс на амплитудна стабилност изнесува 0.95, која послужи како основа за пресметка на релативните брзини на поместување. Нејзините координати се прикажани во Табела 9.

Табела 9 Координати на референтната точка при PSInSAR анализата на Полошката Колина, со процесирање на Sentinel – 1 снимките од расичката орбита

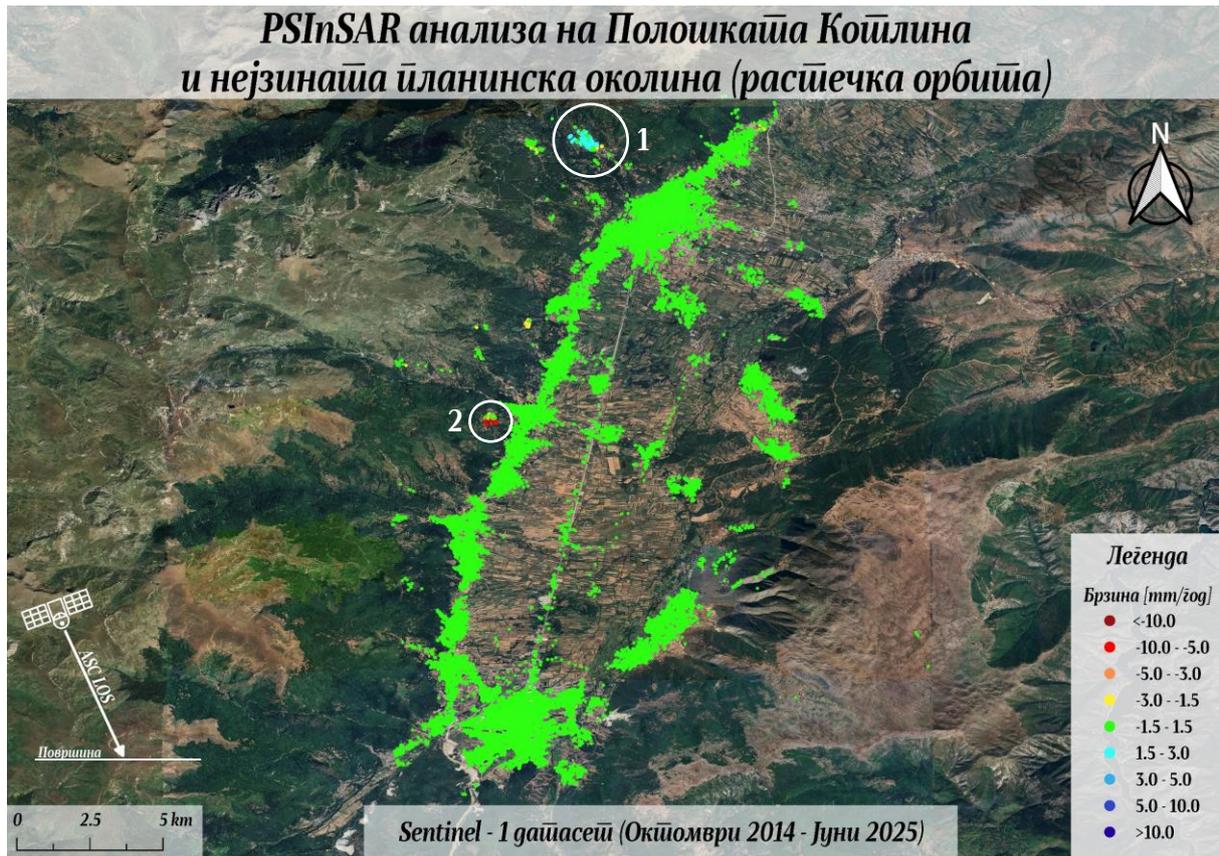
SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
3268	1781	41° 59' 52.95"	20° 57' 08.81"

Резултатите од PSInSAR анализата со снимки од растечка орбита се прикажани на Слика 97 и покажуваат дека поголемиот дел од Полошката Котлина се карактеризира со минимални стапки на поместување во рамките на ± 1 mm/годишно, што упатува на долгорочна стабилност на населените зони, вклучувајќи ги градовите Тетово и Гостивар.

Сепак, на западните падини над Полошката Котлина, долж планинските косини на Шар Планина, кои постепено се спуштаат кон Полошката Котлина, се издвојуваат две рурални населени места каде се евидентирани локализираните зони со поизразени поместувања. Овие подрачја на Слика 97 се означени со бели кружници и соодветно нумерирани, со цел нивна појасна идентификација како критични локации каде се регистрирани деформациски процеси:

1. Површината околу селото **Селце**, 3 km северо – западно од Тетово;
2. Површината околу селото **Раковец**, 1.5 km западно од с. Боговиње.

Детектираните поместувања во овие подрачја укажуваат на можни локални деформациски процеси, што бара нивна подетална анализа и споредба со резултатите од опаѓачката орбита.



Слика 97 Проспирна расиределба на PS тички и брзини на тичестичување (mm/год) за Полошкаиа Котлина и околнаиа тланинска тивршина - расичка орбитиа (Sentinel-1)

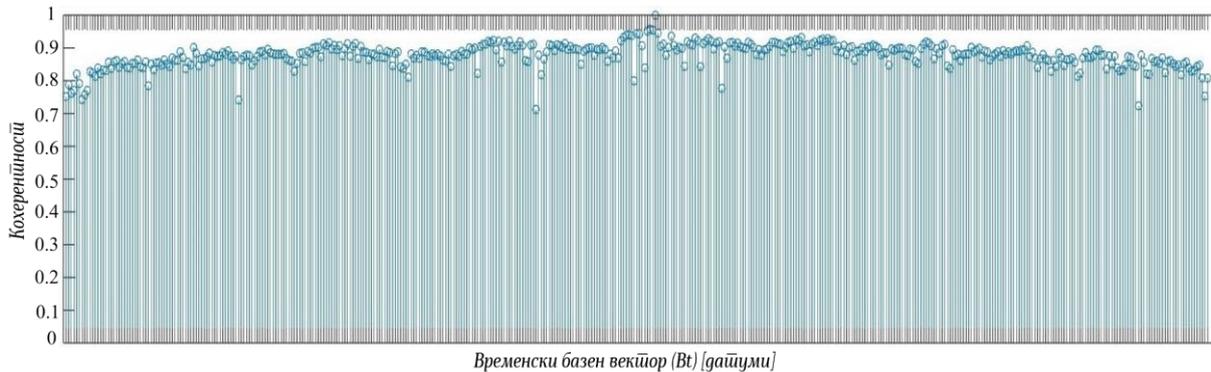
4.3.4 InSAR анализи на Полошката Котлина и нејзината тланинска околина со Sentinel-1 снимки од опагачка (descending) орбита

Анализата со Sentinel-1 снимки од опагачка орбита беше изведена со цел да се обезбеди дополнителна перспектива на поместувањата и да се овозможи декомпозиција на резултатите од двете орбити и определување на источно-западната и вертикалната компонента од поместувањата. Основните карактеристики на Sentinel-1 снимките од опагачка орбита се прикажани во Табела 10.

Табела 10 Основни карактеристички на користениите Sentinel-1 снимки за InSAR анализите на Полошкаиа Котлина (опагачка орбитиа)

Број на SLC снимки	449
Анализиран временски период	Октомври 2014 - Јуни 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален тит	153
TOPS титас	IW1
Агол на аквизиција (θ)	33.8°
Азимутален агол (α)	190.7°

Во рамките на InSAR анализите со снимките од опаѓачката орбита беше дефинирана примарната SAR снимка аквизирана на **17.02.2020 година**, во однос на која сите останати снимки беа корегистрирани. Интерферометриски мрежи користени за PSInSAR и QPSInSAR, по својата структура и густина на конекции помеѓу снимките се речиси идентични со оние за растечката орбита (Слика 95). Мрежата од PS кандидати за определување на атмосферската компонента беше составена од вкупно 1972 точки со индекс на амплитудна стабилност поголем од 0.6. Овие стабилни расејувачи овозможуваат сигурна инверзија и висока кохерентност на снимките по елиминирањето на APS. Резултатите од тестот на кохерентноста по отстранување на APS за секоја снимка се прикажани на Слика 98.



Слика 98 Тест на определување APS за секоја користена снимка во анализата со користење на Sentinel – 1 снимки во Полошката Котлина (descending geometry)

Просторно–временското моделирање беше реализирано врз основа на густа мрежа од PS точки, селектирани според критериумот на индекс на амплитудна стабилност повисок од 0.55. Во процесот беа идентификувани вкупно **24283 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.85. Како и вообичаено, за референтна точка беше одбрана најстабилната точка со индекс на амплитудна стабилност од 0.95, која послужи како основа за изведување на релативните брзини на поместување. Координатите на оваа точка се прикажани во Табела 11.

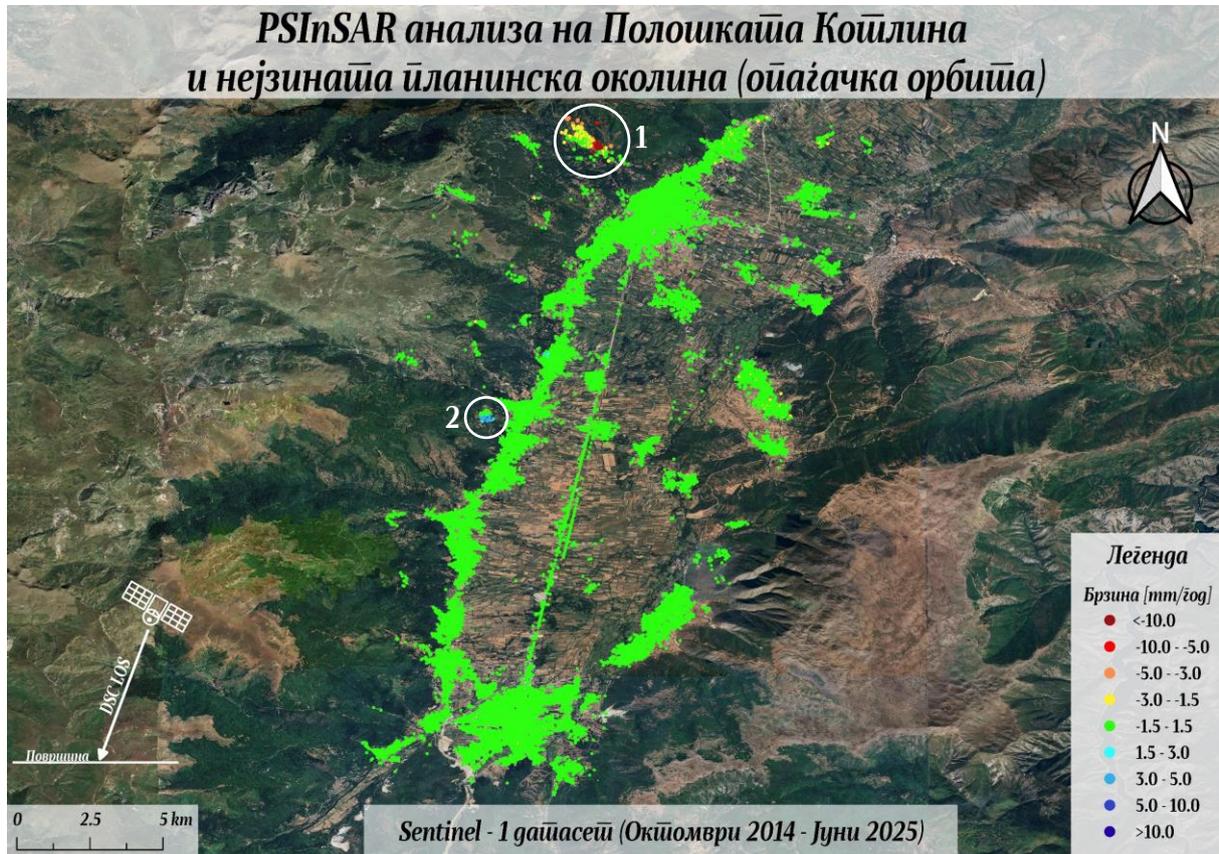
Табела 11 Координати на референтната точка при PSInSAR анализата на Полошката Котлина, со процесирање на Sentinel – 1 снимките од опаѓачка орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
1224	295	42° 00' 41.21"	20° 59' 13.62"

Резултатите добиени од PSInSAR анализата со снимките од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 99 и истите потврдуваат целосна согласност со наодите од растечката орбита. Во рамките на Полошката Котлина се регистрираат минимални поместувања во границите од **±1 mm/годишно**, што недвосмислено укажува на стабилност на котлината и на отсуство на значајни деформациони процеси во текот на целиот анализиран период (2014–2025).

Резултатите од анализата со снимките од опаѓачка орбита во целост ја потврдуваат конзистентноста на деформационите обрасци добиени во растечката орбита. Како што беше очекувано, во селата **Селце** и **Раковец** повторно се детектирани зони со изразени поместувања, при што вредностите се со спротивен предзнак во однос на оние од растечката орбита, што е во

согласност со насоката на набљудување на сателитот. Ваквата корелација меѓу резултатите од двете орбити потврдува дека регистрираните деформации се реални и линеарни во времето, што претставува сигурна основа за нивна понатамошна детална анализа преку комбинирана обработка и декомпозиција на компонентите на поместување.

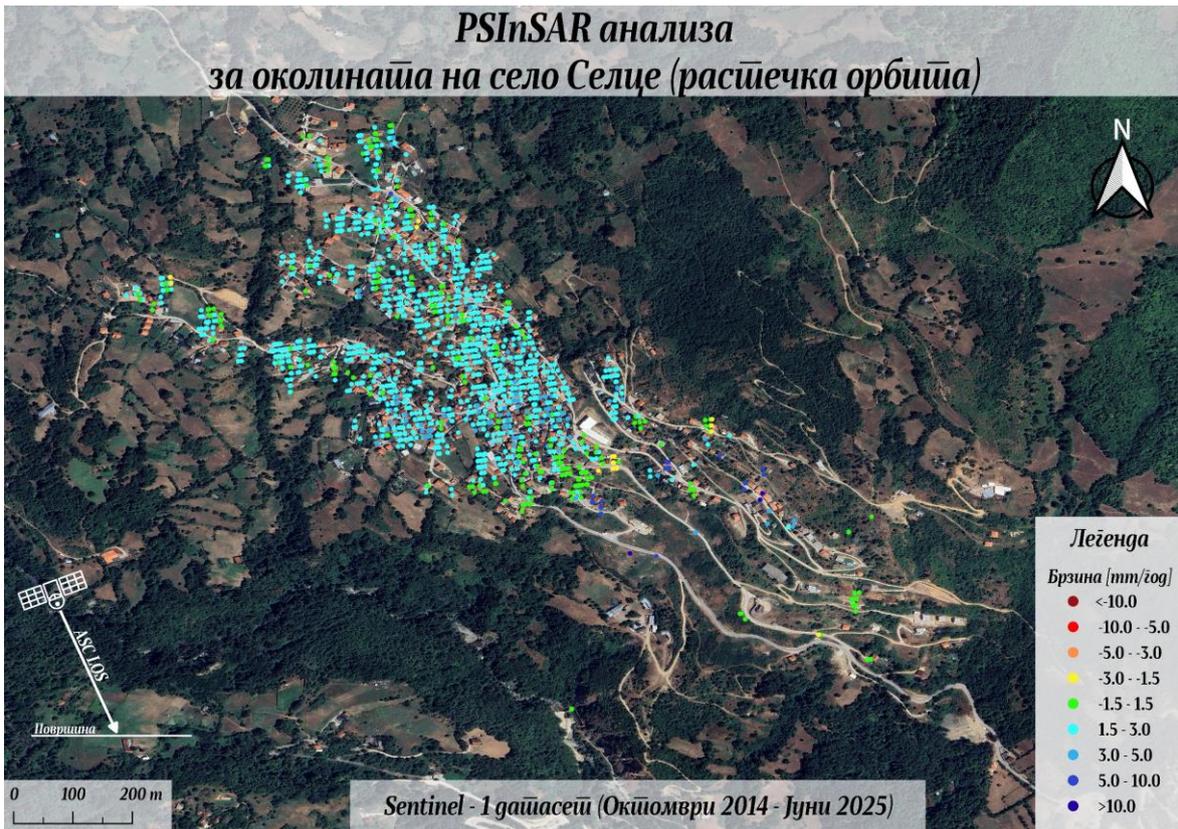


Слика 99 Просџорна расџределба на PS џочки и брзини на џомесџување (mm/џог) за Полошкаџа Коџлина и околната џланинска џовршина - оџаѓачка орбита (Sentinel - 1)

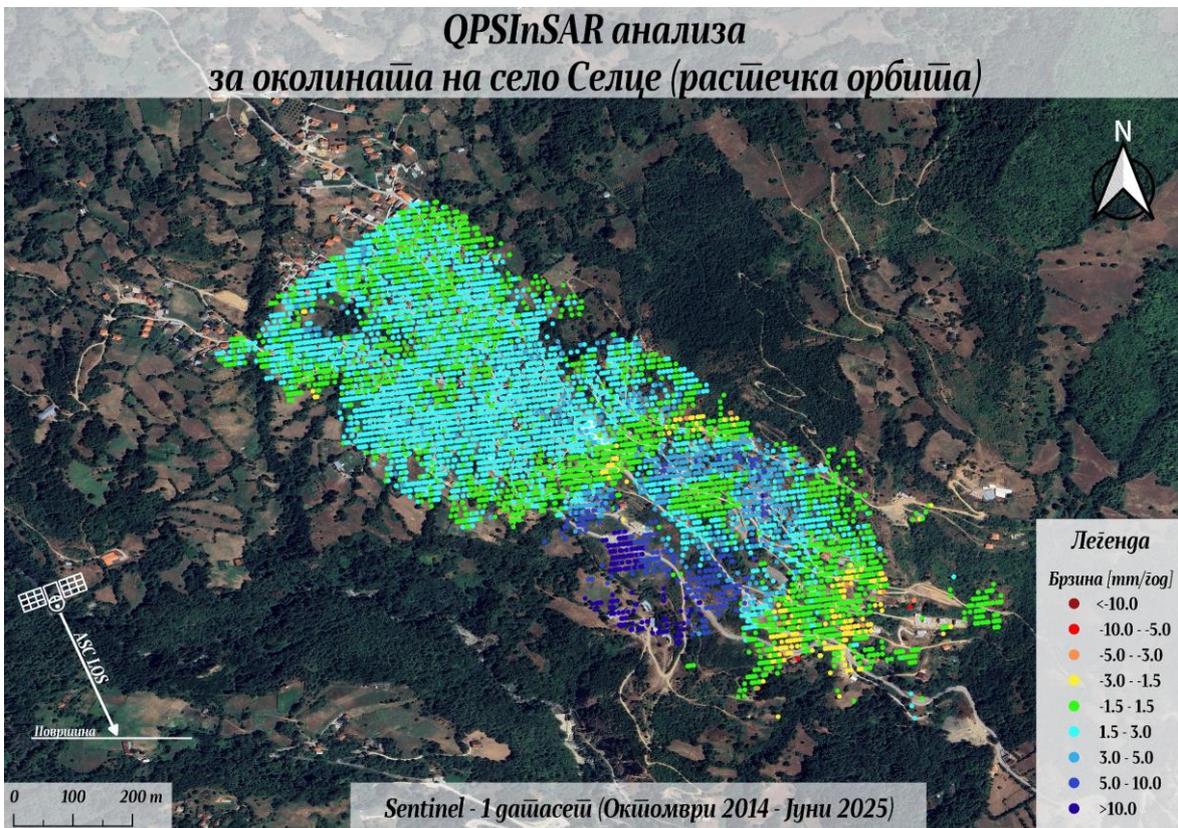
За двете детектирани нестабилни подрачја, лоцирани во селата **Селце** и **Раковец**, спроведени се детални InSAR анализи со примена на PSInSAR и QPSInSAR техниките во рамките на двете орбити (растечка и опаѓачка). Дополнително, извршена е декомпозиција на добиените резултати со цел издвојување на вертикалната и источно-западната компонента на поместувањата. Овие комбинирани анализи овозможуваат подетална проценка на карактерот, интензитетот и насоката на деформациските процеси, како и поцелосно разбирање на нивната просторна распределба и динамички развој во анализираниот временски период.

4.3.5 InSAR анализа на деформациските процеси во околината на село Селце

За подрачјето на село Селце, кое се наоѓа на надморска височина од приближно 820 m, спроведени се детални InSAR анализи со цел подетално да се истражат деформациските процеси детектирани во претходната фаза. Во оваа анализа беа искористени Sentinel-1 SLC снимки од растечка и опаѓачка орбита, врз основа на кои беа добиени стабилни и меѓусебно комплементарни резултати. Понатаму, извршена е декомпозиција на LOS поместувањата со цел издвојување на вертикалната и источно-западната компонента на деформациите. Резултатите од анализата за растечката орбита се прикажани на Слика 100 и Слика 101.



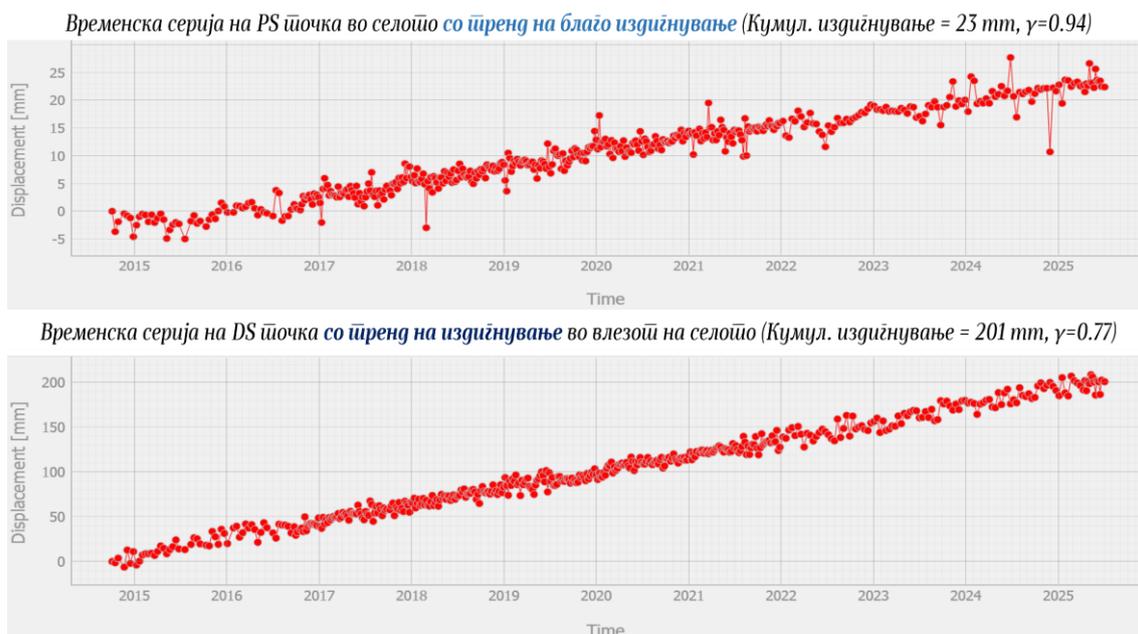
Слика 100 PSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Селце, расширена орбита (Sentinel-1)



Слика 101 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Селце, расширена орбита (Sentinel-1)

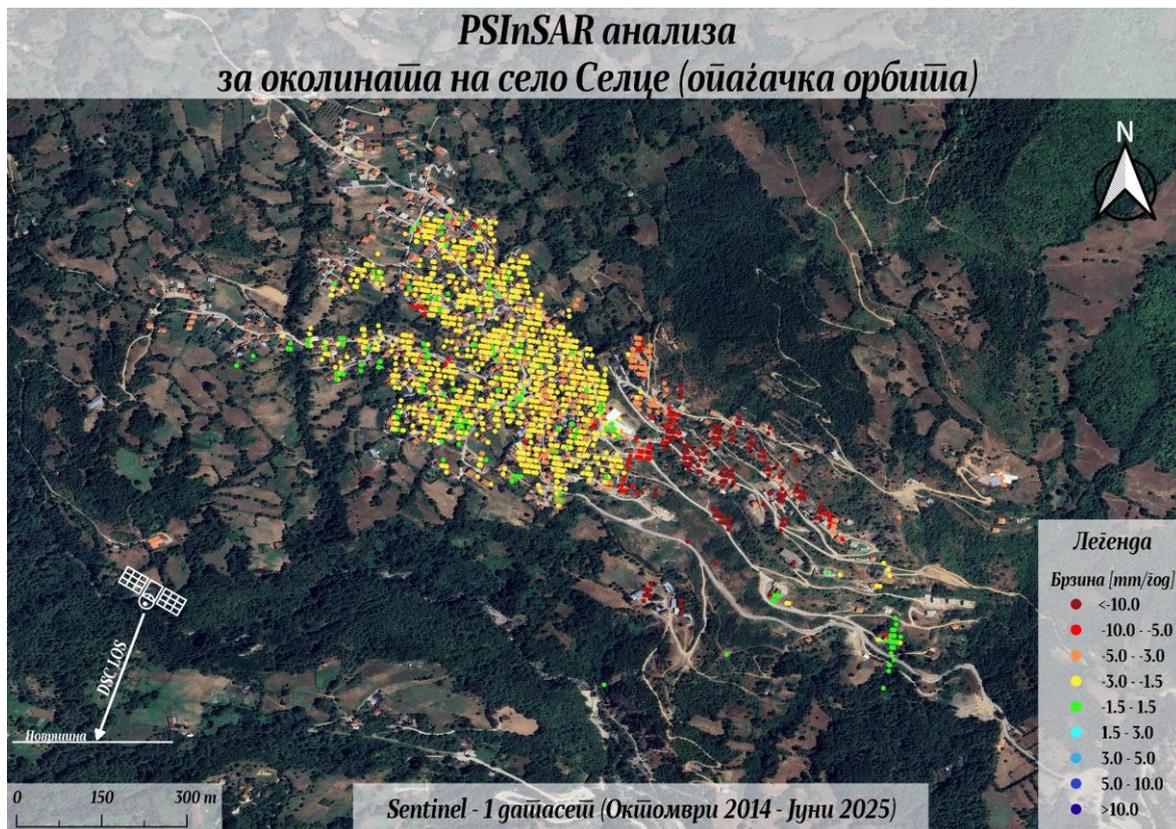
Во рамките на *PSInSAR* анализата со *Sentinel-1* снимки од растечка орбита за околината на село Селце беа идентификувани вкупно **1601 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.71, што укажува на релативно сигурна реконструкција на фазните временски серии. Како што е прикажано на *Слика 100*, точките главно се концентрирани во централното јадро на селото, што е очекуван резултат, бидејќи стабилните расејувачи најчесто потекнуваат од вештачки структури (објекти, покриви, ѕидови) кои создаваат *double-bounce* расејување и задржуваат висока кохерентност низ времето. Секоја точка е обоена според брзината на поместување во насока на правецот на аквизиција (*LOS*), при што позитивните вредности означуваат движење кон сателитот, а негативните оддалечување од него. Во централниот дел на селото доминираат светлосини нијанси, кои укажуваат на *LOS* издигнување на теренот, односно движење кон сателитот во растечката орбита, чија просечна брзина изнесува околу **3 mm/годишно**. Највисоките вредности се регистрирани на **влезот во селото**, каде што брзината на поместување достигнува до **13 mm/годишно**, додека вкупното кумулативно поместување во анализираниот период (2014–2025) надминува **14 cm**, што укажува на постојан и долгорочен тренд на придвижување на површината.

На *Слика 101* се прикажани резултатите од *QPSInSAR* анализата со *Sentinel-1* снимки од растечка орбита, со која се детектирани значително поголем број точки во споредба со *PSInSAR* анализата, односно вкупно **6535 QPS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.77. Примената на оваа техника овозможи подетална просторна репрезентација на деформациското поле, со поширок просторен опфат кој ги опфаќа не само централното јадро, туку и околното периферно подрачје на селото. Иако општата деформациска тенденција останува во согласност со резултатите од *PSInSAR* анализата, *QPSInSAR* обезбедува појасна и посеопфатна слика за карактерот на движењата. Најизразени деформации се забележуваат во југозападниот дел, кој претставува влезот во селото, каде се забележуваат јасно изразено *LOS* издигнување, односно движење кон сателитот, со брзини што достигнуваат до **18 mm/годишно**. Во оваа зона на највисока активност, просечното кумулативно поместување во анализираниот период изнесува околу **10 cm**, додека максималните вредности надминуваат **20 cm**. На *Слика 102* се прикажани временските серии на поместување за две карактеристични точки.



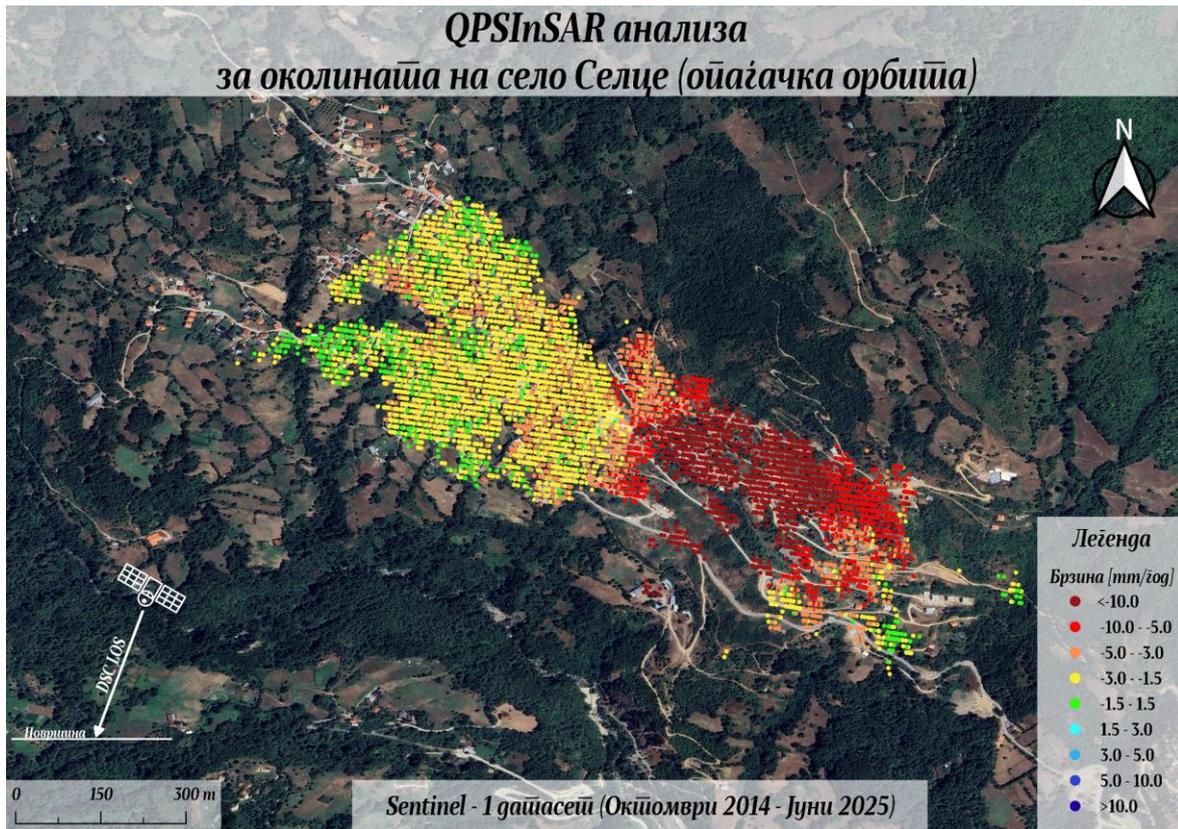
Слика 102 Приказ на временските серии на две точки со тренд на издигнување, растечка орбита (*Sentinel-1*)

Во рамките на *PSInSAR* анализата со снимки од опаѓачката орбита беа идентификувани вкупно **1925 PS точки**, со просечна вредност на темпорална кохерентност од 0.69. Резултатите од оваа анализа се прикажани на *Слика 103* и укажуваат на густо распределени стабилни расејувачи во рамките на изградената површина на селото Селце. Забележливо е дека во влезот на селото е присутен зголемен број на *PS* точки во однос на *PSInSAR* анализата од растечката орбита, што укажува на подобра кохерентност и поизразена радарска стабилност во овој сектор при набљудување од опаѓачка геометрија. Во централниот дел на селото преовладува тенденција на благо *LOS* слегнување, со просечна релативна брзина од околу **-3 mm/годишно** во правецот на аквизиција на опаѓачката орбита. Од друга страна, во источните и југоисточните делови од селото, деформациските обрасци стануваат поизразени, каде забележлива е поголема група на точки со негативни вредности на поместувања. Најзначајните деформации се регистрирани во влезот на селото, каде доминираат точки во црвена нијанса, што укажува на **изразено *LOS* слегнување**, односно придвижување во спротивен правец од сателитот. Во овој сектор максималната брзина достигнува **-33 mm/годишно**, при просечно кумулативно поместување поголемо од **-20 cm** и највисоко регистрирано кумулативно поместување над **-30 cm** во анализираниот период, што укажува на изразена локална нестабилност и континуирано слегнување на теренот.



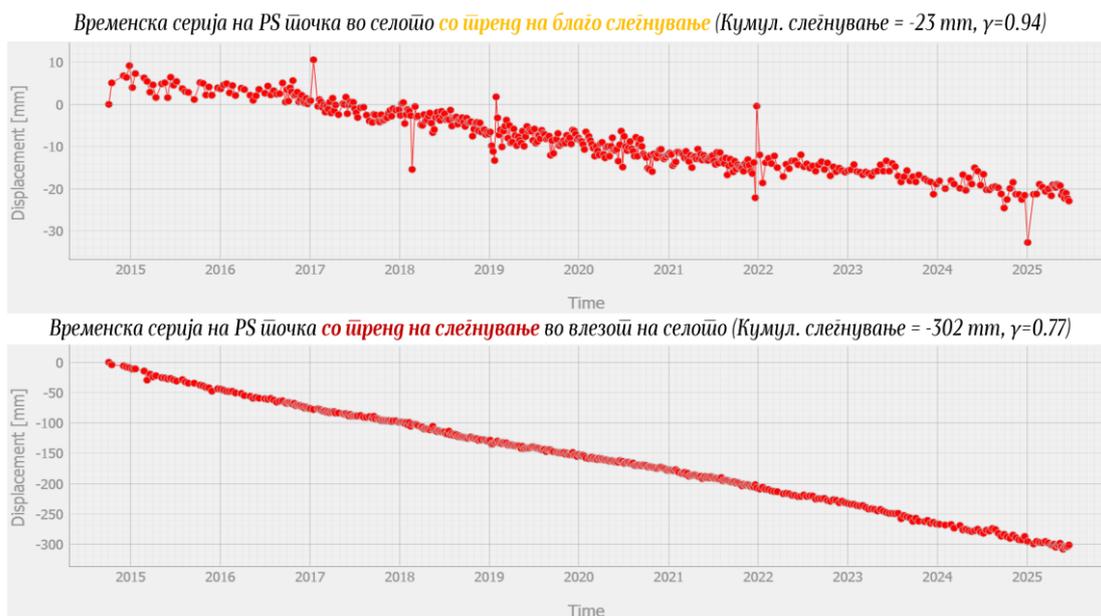
Слика 103 PSInSAR анализа за локално нестабилна зона во село Селце, опаѓачка орбита (Sentinel-1)

Резултатите од *QPSInSAR* анализата за опаѓачкиот сет на *Sentinel - 1* снимките се прикажани на *Слика 104*. Во рамките на оваа обработка беа идентификувани **6758 QPS точки**, со просечна темпорална кохерентност од 0.83, што претставува значително зголемување на густината на расејувачите во однос на *PSInSAR* анализата. Оваа поголема просторна покриеност овозможи подетална и континуирана слика на деформациските полиња, особено во периферните зони на селото.



Слика 104 QPSInSAR анализа за локално нестабилна зона во село Селце, ојагачка орбитиа (Sentinel-1)

Резултатите од QPSInSAR дополнително го потврдуваат деформацискиот образец детектиран со PSInSAR, но овозможуваат подетална интерпретација на интензитетот и просторната распространетост на нестабилните зони. Најизразените поместувања повторно се концентрирани во влезниот дел на селото, каде што поголем број на QPS точки укажуваат на континуирано слегнување, со брзини до -32 mm/годишно , кумулативни вредности што надминуваат -30 cm (Слика 105) и просечни кумулативни слегнувања од околу -20 cm за анализираниот период.

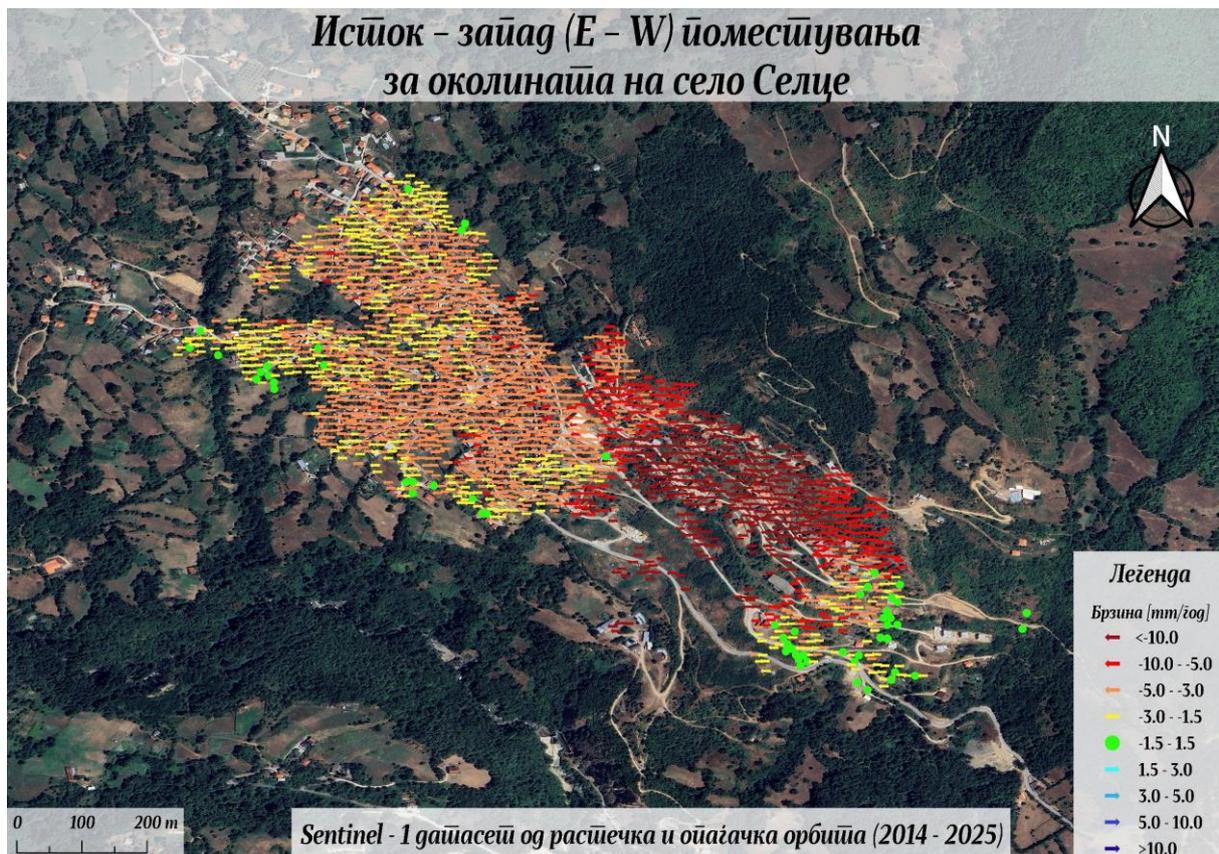


Слика 105 Приказ на временскиите серији на две точки со тренд на слегнување, ојагачка орбитиа (Sentinel-1)

Овие резултати ја потврдуваат високата чувствителност на QPSInSAR техниката во детекција на локализирани деформации и ја нагласуваат потребата од комбинирана анализа на податоците од растечката и опаѓачката орбита, со цел да се добие покомплетна слика за просторната насока на движењата.

Резултати од двете орбитални насоки прикажуваат комплементарни LOS поместувања од двете орбити, но истите се проектирани по должина на правецот на аквизиција на соодветната орбита. Ова ограничување се должи на фактот што LOS поместувањата се силно зависни од аголот на аквизиција (θ) и азимуталниот агол (α) на сателитот, кои ја дефинираат геометријата на радарската аквизиција. Поради тоа, беше изведена декомпозиција на LOS поместувањата во вертикална и источно-западна компонента, со цел да се обезбеди физички поинтуитивна и попрецизна интерпретација на деформациските процеси во околината на селото Селце.

Декомпозицијата беше реализирана врз основа на системот равенки дефиниран со релацијата (66), кој овозможува раздвојување на LOS поместувањата добиени од двете орбити на вертикална и источно-западна компонента. При декомпозицијата беше применет стандардниот пристап, кој предвидува занемарување на северо-јужната компонента, со што се обезбеди еднозначно решение на системот. За таа цел беше искористен QGIS плагинот, кој се базира на истиот методолошки пристап, поточно на системот од равенки применет во претходната студија на случај. Притоа, теренот беше поделен на области на униформно движење (RUM), односно на квадратни ќелии со страни од 7.2 m, во рамките на која сите точки се сметаа дека поседуваат идентичен вектор на поместување. Источно - западната компонента од поместувањето е прикажана на Слика 106.



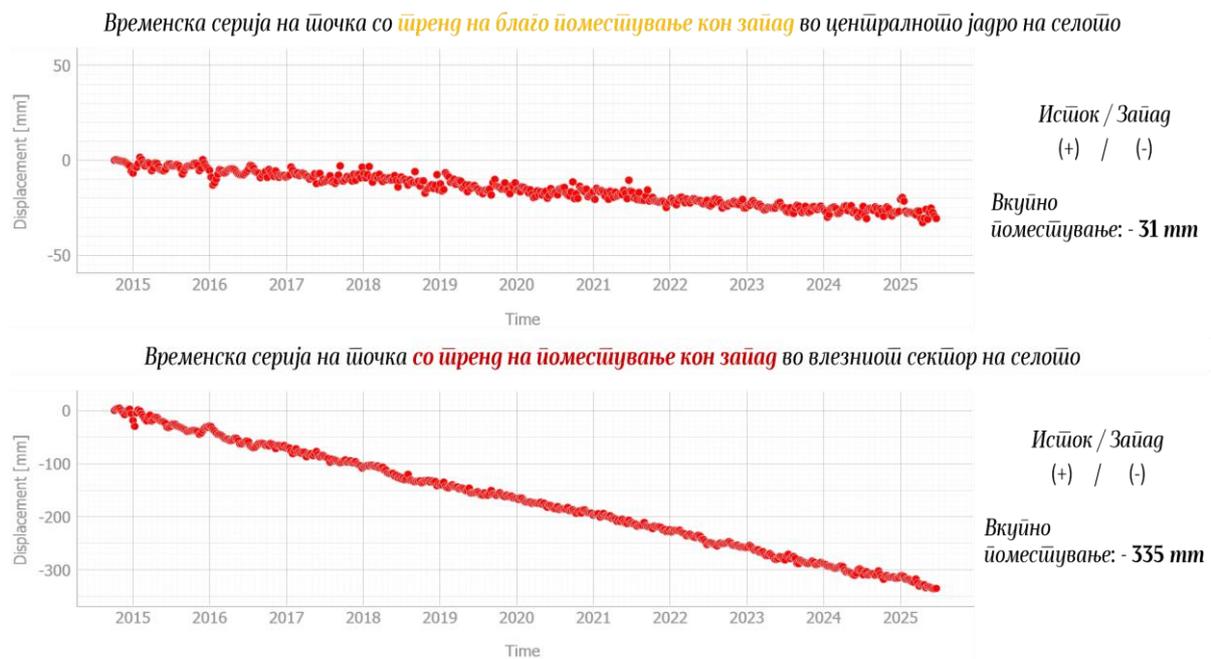
Слика 106 Приказ на источно - западната компонента и декомпозицијата во село Селце

На Слика 106 се прикажани резултатите од декомпозицијата на LOS поместувањата, кои ја прикажуваат источно-западната компонента на деформациите во подрачјето на селото Селце. Во легендата, поместувањата кон запад се претставени со стрелки ориентирани налево, обоени од жолта до темноцрвена нијанса во зависност од интензитетот на движењето. Зелените кругчиња ги означуваат точките со незначителни хоризонтални поместувања, што укажува на релативна стабилност, додека поместувањата кон исток се прикажани со стрелки во сини нијанси, во овој случај не се детектирани.

Резултатите покажуваат дека поместувањата кон **запад** се присутни на поголемиот дел од анализираното подрачје, при што сите регистрирани движења се насочени во ист правец, но се разликуваат според нивниот интензитет. Во централниот дел на селото се забележува бавен, но континуиран процес на придвижување, со просечни брзини од околу **4 mm/годишно**. Во влезот на селото, се издвојува зона со значително повисока деформациска активност, каде се забележува густо групирање на темноцрвени стрелки насочени кон запад, што укажува на интензивни локални поместувања. Во овој сектор, просечните кумулативни поместувања надминуваат **20 cm**, додека максималните брзини достигнуваат до **30 mm/годишно**, а највисоките кумулативни поместувања кон запад кои се појавуваат на неколку локации се проценуваат на околу **35 cm** во текот на анализираниот период (октомври 2014 – јуни 2025).

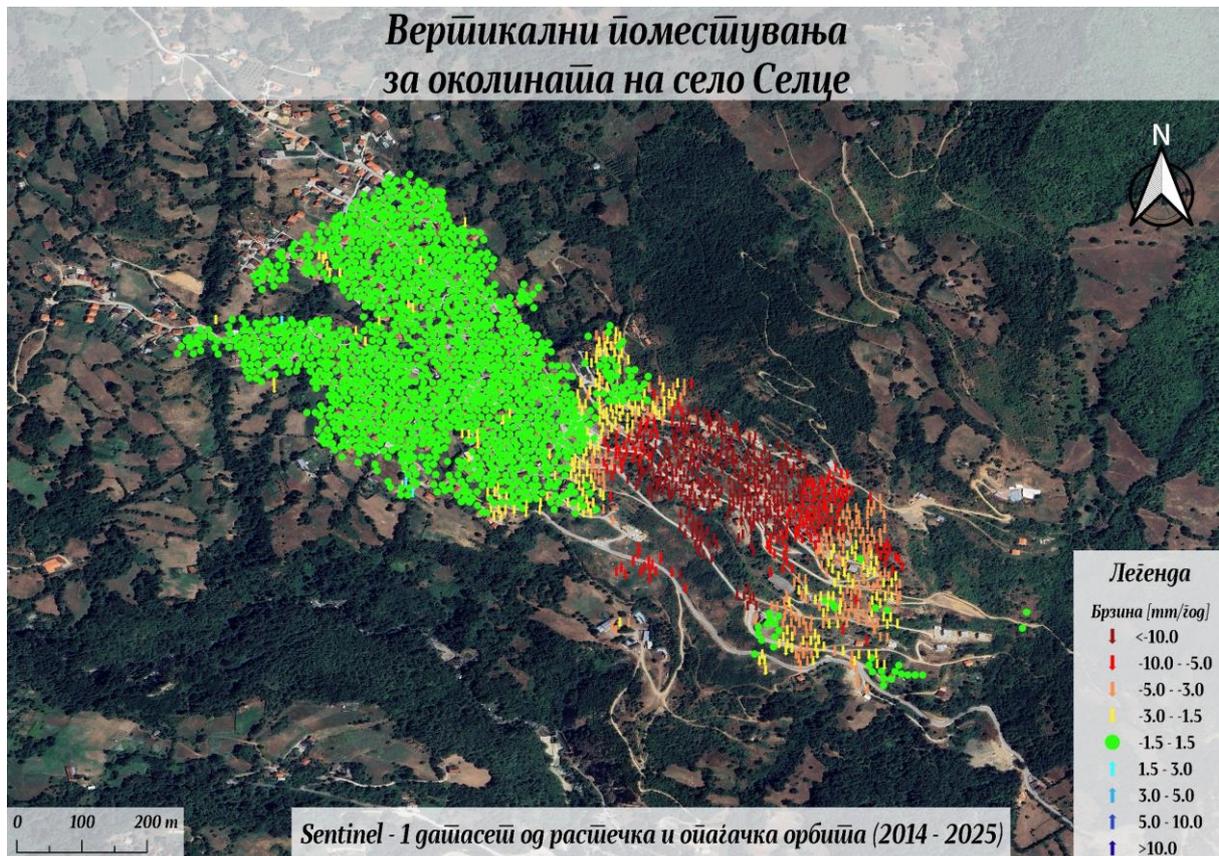
Овие резултати недвосмислено го потврдуваат доминирањето на западно насочените движења на критичното подрачје, при што влезниот дел на Селце претставува најактивна и најнестабилна зона, додека останатите делови на селото се карактеризираат со понизок интензитет на деформации и поголема стабилност на теренот.

На Слика 107/Слика 84 се прикажани временските серии од исток – запад поместувањата за две карактеристични точки, едната лоцирана во централното јадро на селото, а другата во влезниот сектор, каде се забележуваат најголеми поместувања кон запад.



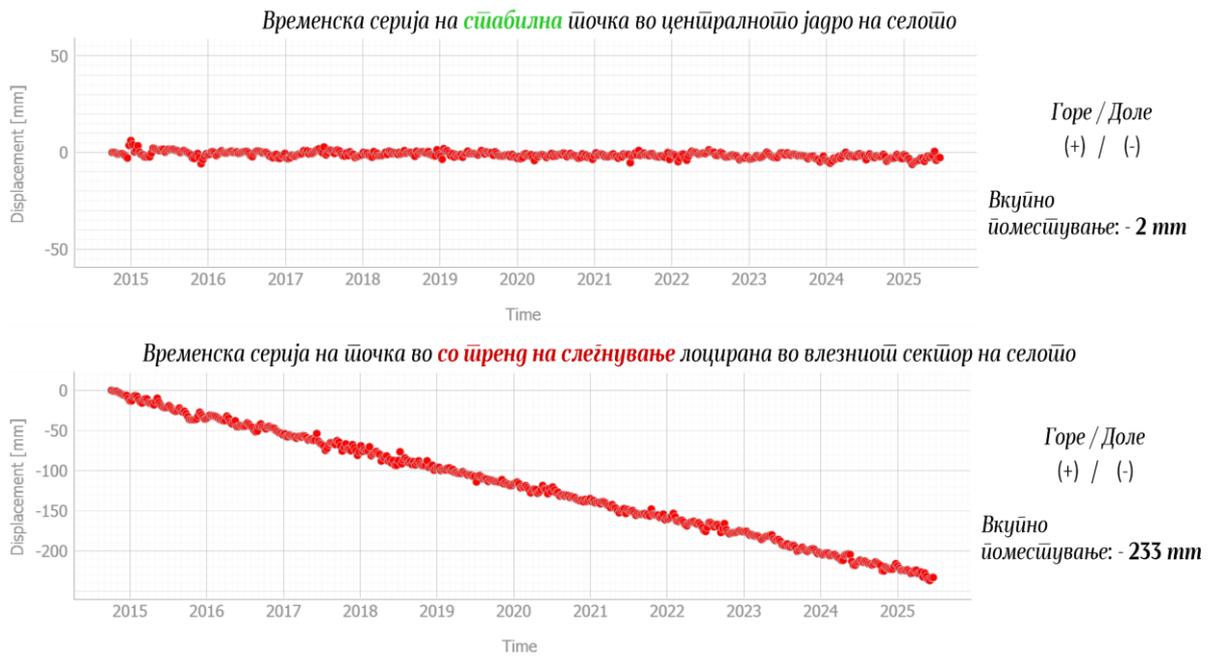
Слика 107 Приказ на временските серии на две точки во централното јадро и влезниот сектор на село Селце, добиени од декомпозираната исток-запад компонента на поместување

На Слика 108 се прикажани резултатите од декомпозицијата на LOS поместувањата, кои ја претставуваат вертикалната компонента на деформациите во подрачјето на селото Селце. На сликата се прикажани зелените ознаки што ги претставуваат стабилните точки со минимални вертикални поместувања, како и стрелките насочени надолу кои укажуваат на зони на слегнување. Интензитетот на овие вертикални деформации варира во зависност од бојата на стрелките, посветлите, жолтеникави нијанси означуваат помал интензитет на спуштање, додека потемните, црвени нијанси укажуваат на поизразено слегнување на површината.



Слика 108 Приказ на вертикалната компонента од декомпозицијата во село Селце

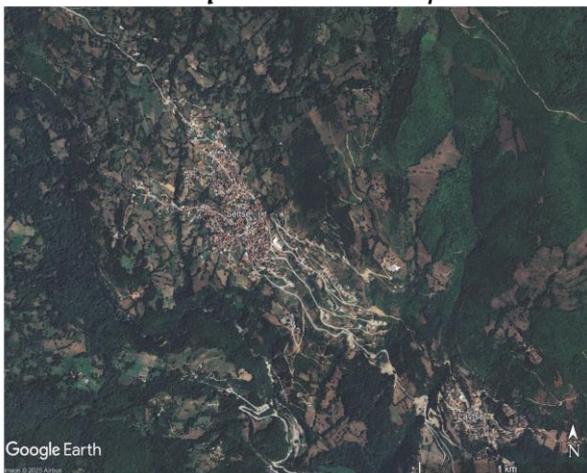
Резултатите покажуваат дека во централното јадро на селото не се забележуваат значајни вертикални поместувања, што укажува на вертикална стабилност на овој дел од селото. Минимални деформации се евидентирани во југоисточните делови од анализираното подрачје, односно во зоната пред влезниот сектор на селото, каде се регистрирани мали, но континуирани вертикални поместувања. Најизразените вертикални слегнувања се забележуваат во влезниот дел на селото, каде што е формирана јасно дефинирана **зона на слегнување** со релативни брзини на слегнување кои достигнуваат **20 mm/годишно**. Во оваа зона, просечните кумулативни слегнувања изнесуваат околу **20 cm**, додека максималните вредности надминуваат **23 cm** во текот на анализираниот период (октомври 2014 – јуни 2025). Овие резултати укажуваат на континуиран процес на слегнување, кој е просторно концентриран во влезниот сектор на селото, додека централните и периферните делови остануваат генерално стабилни и без значајни вертикални промени. На Слика 109 се прикажани временските серии на поместувањата во вертикална претстава за две карактеристични точки, едната лоцирана во централното јадро на селото, а другата во влезниот сектор, каде се забележуваат најголеми слегнувања.



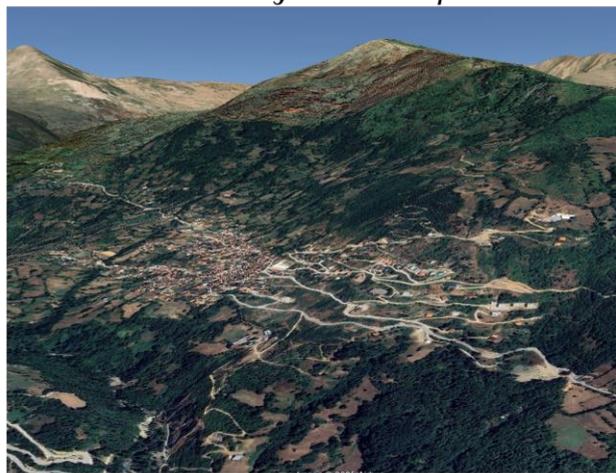
Слика 109 Приказ на временските серии на две тачки во централното јадро и влезниот сектор на село Селце, добиени од декомпозираната вертикална компонента на поместување

Резултати од декомпозицијата на поместувањата во источно-западната и вертикалната компонента укажуваат на јасно изразена корелација со морфолошките карактеристики на теренот. Како што може да се забележи од 3D приказот на теренот во кој е сместено селото Селце (Слика 110), населеното место е развиено на благо наклонета косина ориентирана приближно во насока југозапад-североисток, при што теренот постепено се издигнува кон североисток. Оваа вертикална конфигурација на теренот создава природен висински градиент, што е јасно видливо на 3D приказот каде се забележува постепено спуштање на теренот од планинскиот раб кон долињската зона. Таквата топографска поставеност придонесува забележаните западно насочени хоризонтални поместувања и вертикални слегнувања во влезниот дел од селото да имаат логична морфолошка интерпретација, бидејќи се јавуваат токму по должината на падината каде гравитациските процеси имаат најсилно изразено влијание.

2D приказ на село Селце



3D поглед на село Селце



Слика 110 Просјорна поставеност и 3D поглед на теренот во кој е сместено селото Селце (Google Earth)

4.3.6 InSAR анализа на деформациските процеси во околината на село Раковец

За подрачјето на село Раковец, кое е сместено на надморска височина од околу 790 m, изведени се детални InSAR анализи насочени кон карактеризација на локалните деформациски процеси идентификувани во претходната фаза. Анализите се базирани на Sentinel-1 SLC снимки од растечка и опаѓачка орбита, со што е обезбедена соодветна временска и геометриска конзистентност за примена на напредните InSAR техники. Понатамошната декомпозиција на LOS поместувањата овозможи раздвојување на вертикалната и источно-западната компонента на деформациите, што претставува основа за поцелосна интерпретација на карактерот и насоката на забележаните движења.

Резултатите од PSInSAR анализата со снимки од растечката орбита се прикажани на Слика 111.



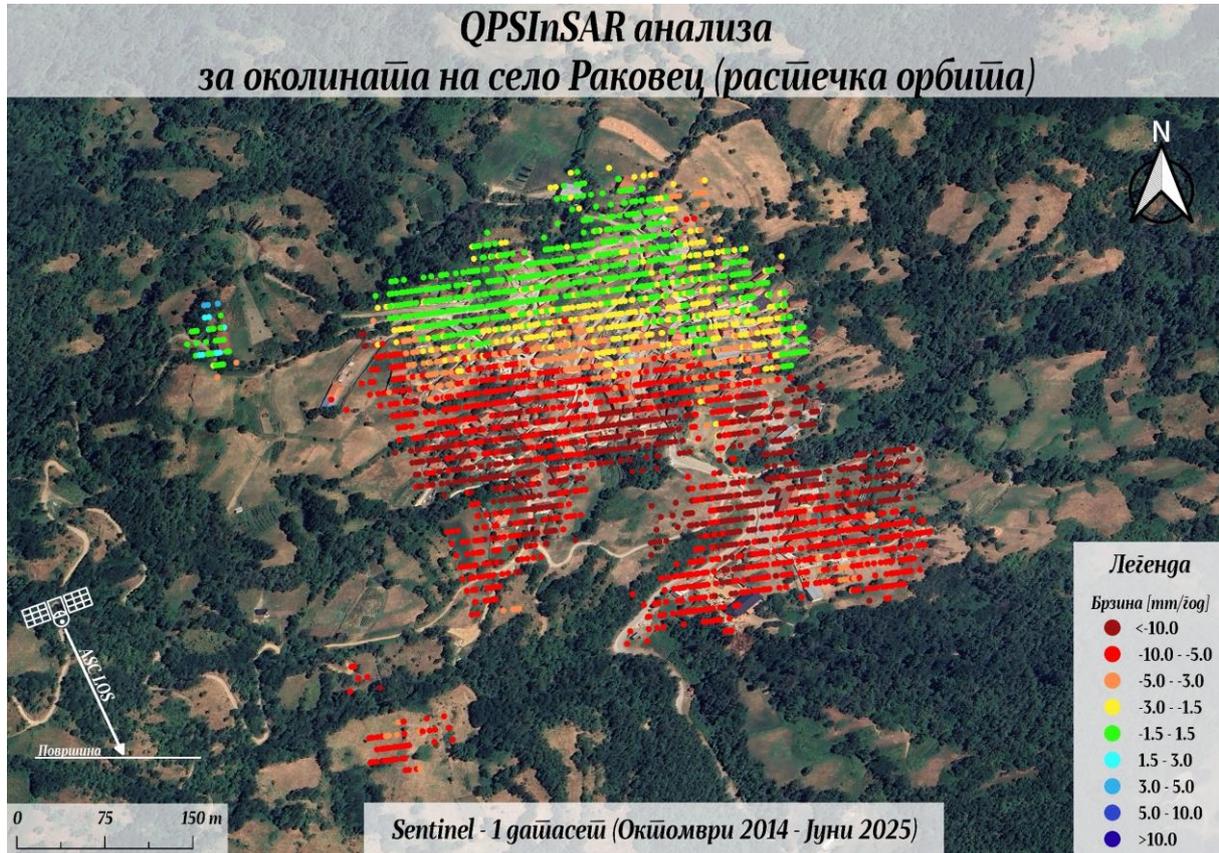
Слика 111 PSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Раковец, растечка орбита (Sentinel-1)

Во рамките на PSInSAR анализата со Sentinel-1 снимки од растечка орбита за подрачјето на село Раковец беа идентификувани вкупно **499 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.68, што укажува на задоволителна сигурност во реконструкцијата на фазните временски серии. Како што е прикажано на Слика 111, PS точките се концентрирани претежно по објектите, кои овозможуваат задржување на фазната конзистентност низ времето.

Во поглед на просторната распределба на деформациите, северниот дел на селото се карактеризира со релативна стабилност и минимални LOS поместувања, додека во јужниот дел се забележува поизразен деформациски тренд, при што доминираат црвено обоени PS точки што укажуваат на LOS поместувања во насока на оддалечување од сателитот. Овие движења укажуваат на зголемување на растојанието меѓу површината и орбитата во правецот на аквизиција, што во

физичка смисла може да се толкува како слегнување на теренот. Во оваа зона, просечното кумулативно поместување изнесува околу -9 cm , додека максималните брзини достигнуваат -13 mm/годишно , што одговара на повеќе од -13 cm кумулативно LOS поместување за целиот анализиран период (2014–2025). Овие резултати укажуваат на локализиран, но континуиран процес на деформација, ограничен главно на јужниот дел од селото.

Резултатите од QPSInSAR анализата со снимки од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 112.

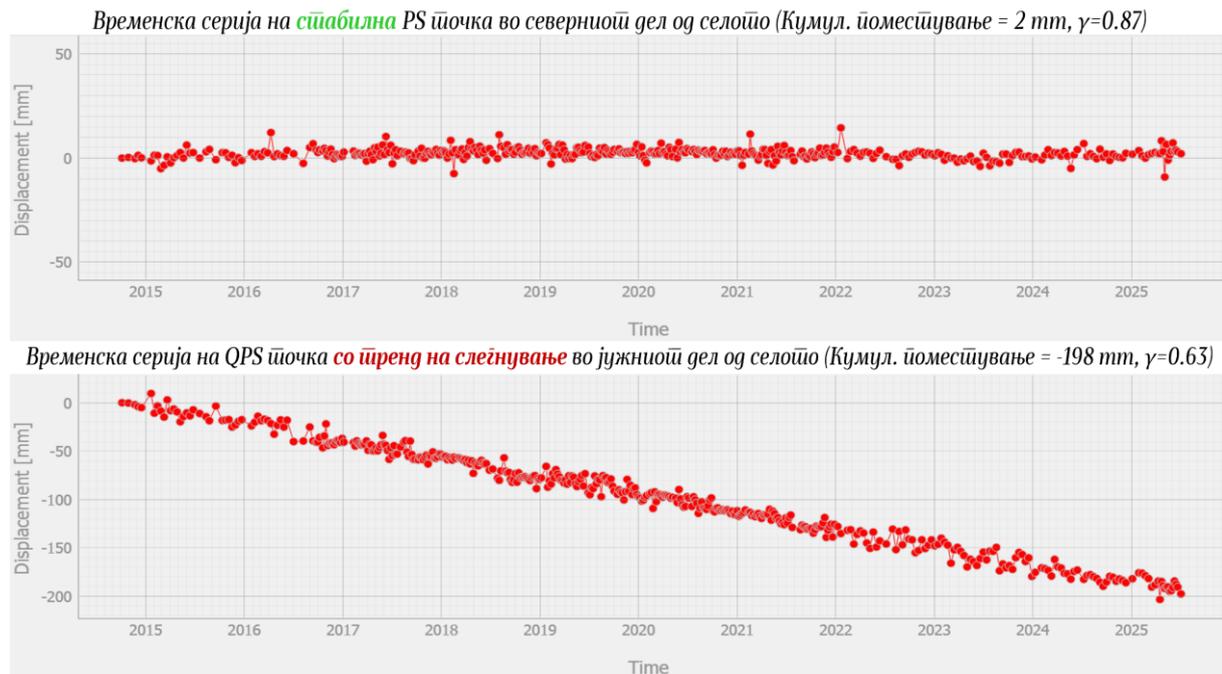


Слика 112 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Раковец, распечка орбита (Sentinel-1)

Во рамките на QPSInSAR анализата за подрачјето на село Раковец, спроведена со Sentinel-1 снимки од распечка орбита, беа идентификувани вкупно **3519 QPS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.73. Како што е прикажано на Слика 112, зголемената густина на детектирани точки овозможува подетална просторна репрезентација на деформациониот образец, при што точките не се ограничени исклучиво на објектите, туку се распоредени и по околната површина.

Резултатите од оваа анализа го потврдуваат истиот деформациски тренд идентификуван со PSInSAR анализата, но со значително поголема просторна резолуција и попрецизно дефинирани зони на активност. Најизразените LOS поместувања во насока оддалечена од сателитот се регистрирани во јужниот дел од селото, каде што максималните брзини надминуваат -20 mm/годишно , што соодветствува на повеќе од -20 cm кумулативно поместување за целиот анализиран период (2014–2025). Во оваа зона, просечното кумулативно поместување изнесува нешто повеќе од -10 cm , што укажува на континуиран деформациски процес со јасна просторна кохерентност.

На Слика 113 се прикажани временските серии од InSAR анализите на две карактеристични точки во северниот и јужниот дел од селото Раковец.



Слика 113 Приказ на временските серии на две карактеристични точки во село Раковец, расипчка орбита (Sentinel-1)

Резултатите од *PSInSAR* анализата со снимки од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 114. Во рамките на оваа анализата за подрачјето на село Раковец беа идентификувани вкупно **368 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.65, што укажува на задоволителна конзистентност на фазните временски серии. Како што е прикажано на Слика 114, PS точките се концентрирани претежно по објектите, каде што условите за стабилно радарско расејување овозможуваат сигурна реконструкција на деформациските сигнали низ времето.

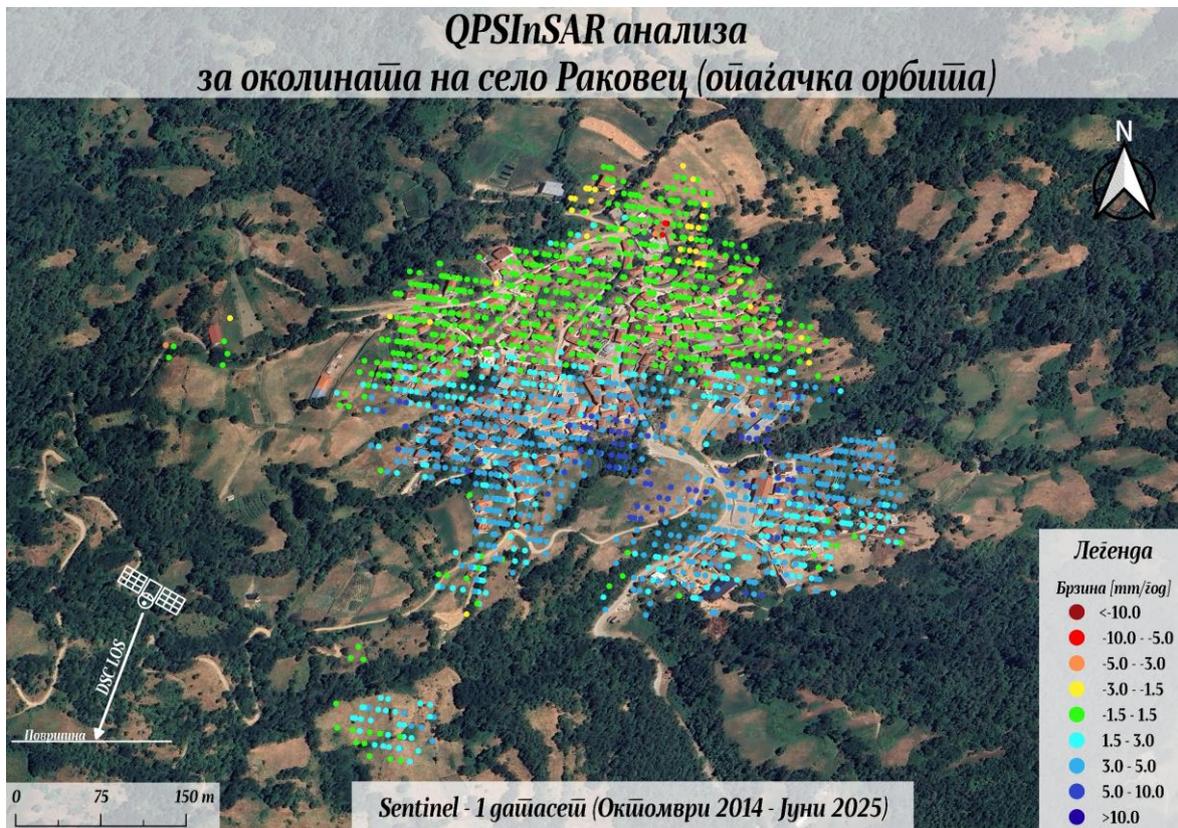
Во поглед на просторната распределба на резултатите, северниот дел од селото повторно се карактеризира со релативна стабилност и отсуство на значајни *LOS* поместувања, што е во согласност со анализата добиена од растечката орбита. Спротивно на тоа, јужниот дел на селото покажува поизразен деформациски тренд, при што доминираат сини и светлосини PS точки, кои укажуваат на *LOS* поместувања во насока кон сателитот, односно издигнување на теренот во правецот на аквизиција на опаѓачката орбита. Во оваа зона, максималните брзини на поместување достигнуваат до **7 mm/годишно**, што одговара на повеќе од **7 cm** кумулативно *LOS* поместување во текот на анализираниот период (2014–2025), додека просечните *LOS* поместување во истиот сектор изнесуваат околу **5 cm**.

Овие резултати укажуваат дека иако деформацискиот процес е локализиран, неговата конзистентна појава во резултатите од анализите од двете орбити ја потврдува постојаноста на движењата во јужниот дел на селото, што го издвојува овој сектор како структурно и морфолошки поактивна зона во рамките на анализираното подрачје.

Резултатите од *QPSInSAR* анализата за село Раковец со *Sentinel-1* снимки од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 115.



Слика 114 PSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Раковец, ојачачка орбита (Sentinel-1)



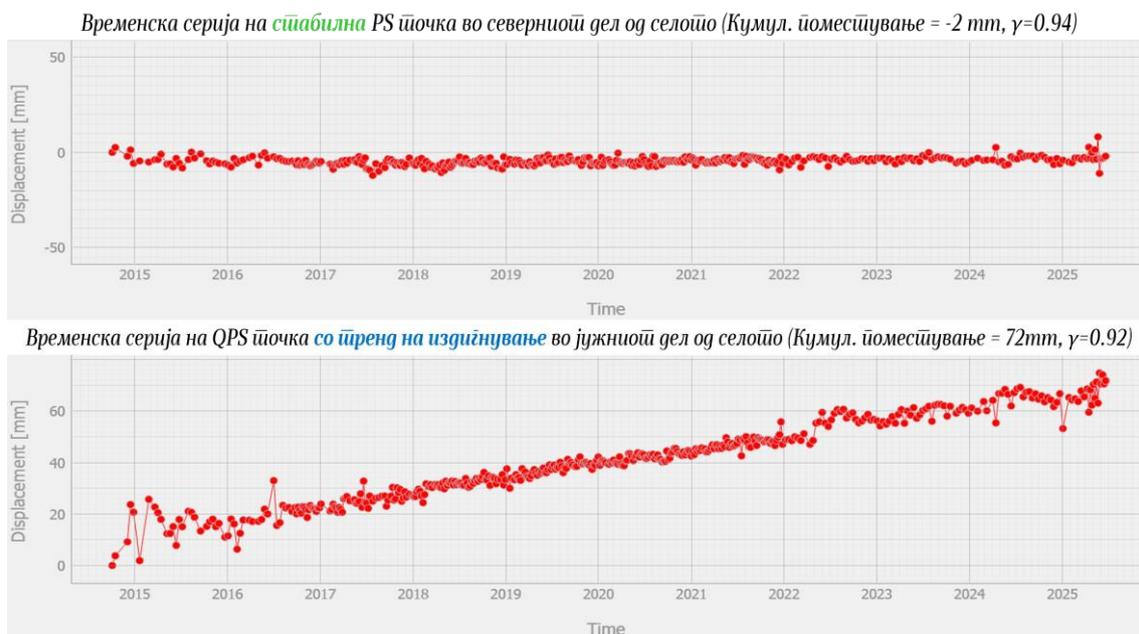
Слика 115 QPSInSAR анализа за локално несџабилна зона во село Раковец, ојачачка орбита (Sentinel-1)

Во рамките на *QPSInSAR* анализата за подрачјето на село Раковец, спроведена со *Sentinel-1* снимки од опаѓачка орбита, беа идентификувани вкупно **1608 QPS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.80, што укажува на висока стабилност и сигурност на добиените фазни вредности. Како што е прикажано на *Слика 115*, примената на *QPSInSAR* техниката овозможи значително поголема густина и просторна деталност на детектираните расејувачи во споредба со *PSInSAR* анализата. Притоа, *QPS* точките не се ограничени исклучиво на изградените структури, туку се распределени и низ околните површини, што обезбедува подетална репрезентација на деформациското поле.

Во поглед на просторната распределба на резултатите, северниот дел на селото повторно не покажува забележливи *LOS* поместувања, што е целосно конзистентно со резултатите добиени од претходните анализи. Од друга страна, јужниот дел на селото се издвојува како зона со поизразени *LOS* поместувања во насока кон сателитот, односно издигнување на теренот во правецот на аквизиција од опаѓачката орбита. Во овој сектор, детектираните поместувања се идентични од претходно спроведената *PSInSAR* анализа, каде максималните брзини на поместување достигнуваат до **7 mm/годишно**, што соодветствува на повеќе од **7 cm** кумулативно *LOS* поместување во анализираниот период (2014 – 2025), додека просечните вредности изнесуваат околу **5 cm**.

Овие резултати ја потврдуваат стабилноста на северниот дел и континуитетот на деформацискиот процес во јужниот дел на селото, укажувајќи дека карактерот и интензитетот на движењата се доследни низ различните техники и орбитални геометрии.

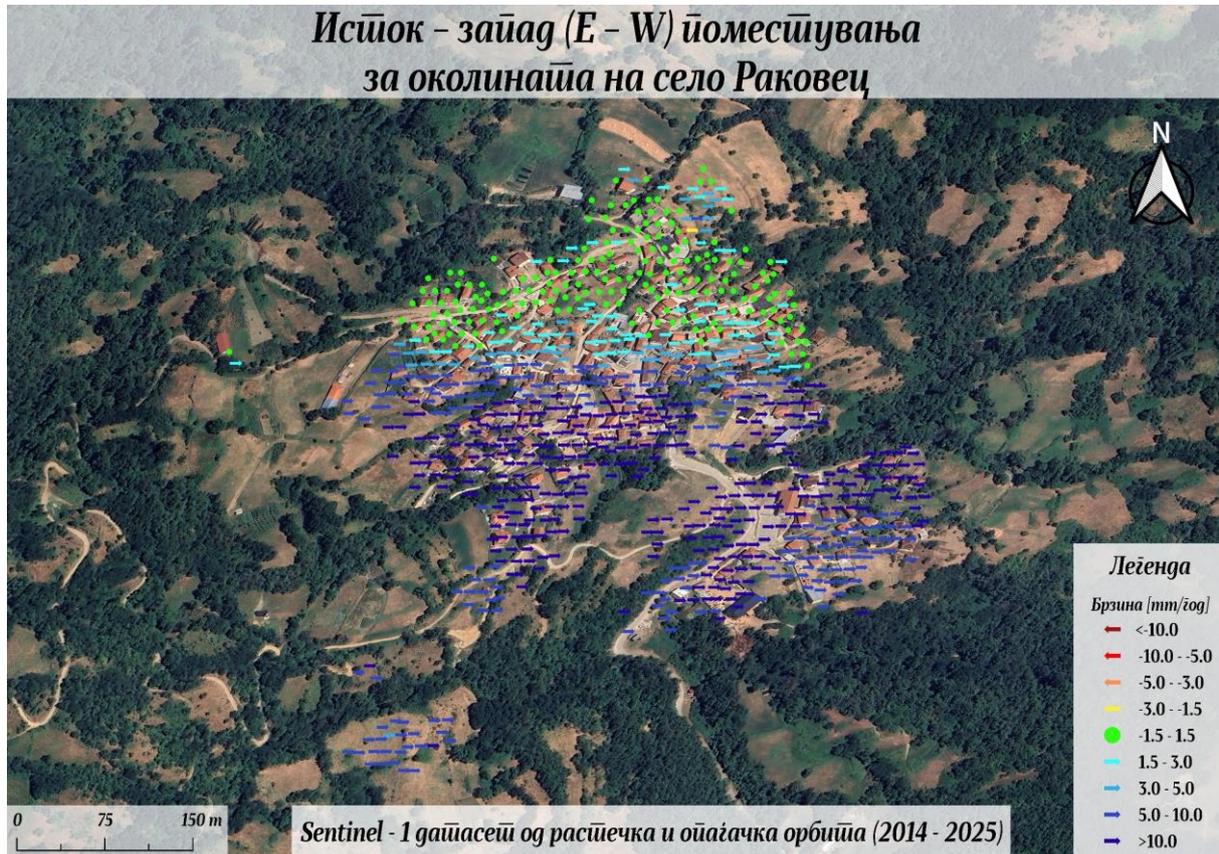
На *Слика 116* се прикажани временските серии од *InSAR* анализите со снимки од опаѓачка орбита на две карактеристични точки во северниот и јужниот дел од селото Раковец.



Слика 116 Приказ на временските серии на две карактеристични точки во село Раковец, опаѓачка орбита (*Sentinel-1*)

По добиените резултати од *InSAR* анализите во двете орбити, извршена е декомпозиција на *LOS* поместувањата на вертикалната и источно-западната компонента на поместувањата.

Во случајот за село Раковец, декомпозицијата на LOS поместувањата беше спроведена по истата методолошка постапка применета и кај претходните примери, со користење на QGIS плагиноот и системот на равенки дефиниран со релацијата (66). За потребите на анализата, теренот беше поделен на области на униформно движење (RUM), односно квадрати со димензии од 6.7 m, што овозможи стабилна и конзистентна проценка на компонентите на поместување. На овој начин беа издвоени вертикалната и источно-западната компонента на деформациите, со што се доби поцелосна претстава за насоката и карактерот на движењата во подрачјето на селото Раковец.

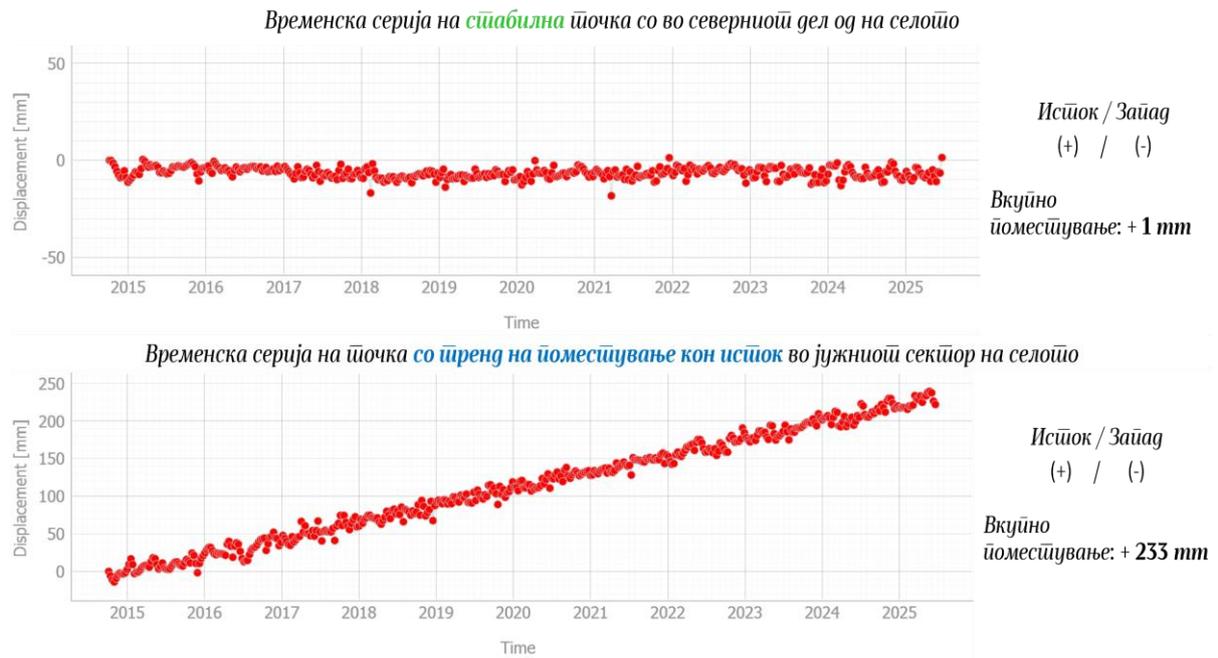


Слика 117 Приказ на источно - западната компонента и декомпозицијата во село Раковец

На Слика 117 се прикажани резултатите од декомпозицијата на LOS поместувањата, кои ја претставуваат источно-западната компонента на поместувањата во подрачјето на село Раковец. Притоа на сликата забележливи се сини стрелки насочени кон исток и зелени кругчиња кои означуваат точки со мали и незначителни поместувања во правец исток - запад, што упатува на релативна стабилност на тој дел од теренот.

Резултатите покажуваат дека во северниот дел од селото генерално не се детектирани поместувања во насока исток-запад, со исклучок на најсеверниот раб, каде се забележуваат мали поместувања кон исток. Но, движејќи се кон јужниот дел од селото, кој претставува критична зона во рамките на населеното место, се забележува постепена градација на интензитетот на деформациите, со сè поголема застапеност на сини стрелки ориентирани кон исток. Ова укажува дека повеќе од половина од анализираното подрачје има поместувања кон исток, кои се најизразени токму во овој јужен сектор. Просечните кумулативни вредности на поместување во оваа зона изнесуваат околу 12 cm, додека максималните достигнуваат до 24 cm за анализираниот период (2014-2025), што укажува на јасно изразен хоризонтален тренд на придвижување кон исток.

На Слика 118 се претставени временските серии на две карактеристични точки, една во северниот стабилен дел од селото во кој не се детектирани поместувања во исток – запад правецот, а втората во јужниот дел каде се детектирани големи поместувања кон исток.

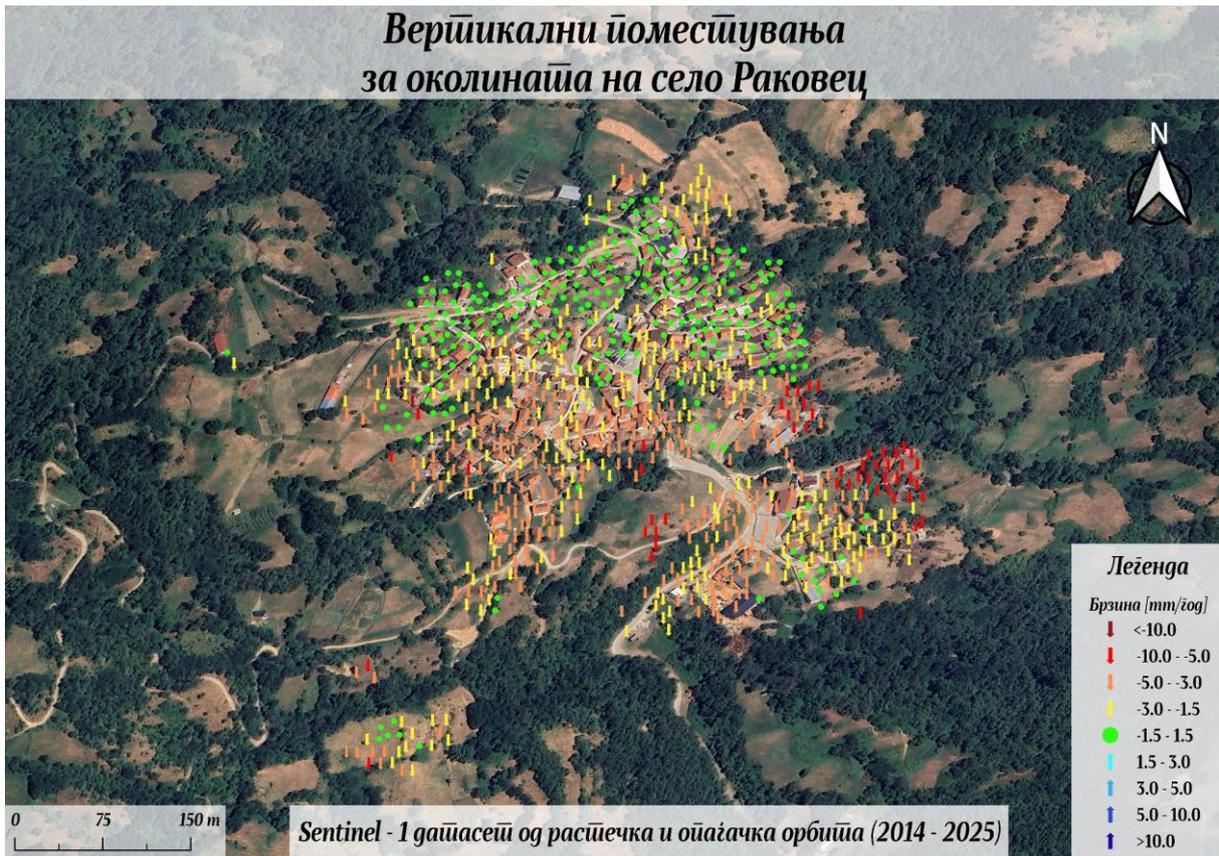


Слика 118 Приказ на временските серии на две точки во северниот и јужниот дел на село Раковец, добиени од декомпозираната исток–запад компонентата на поместување

На Слика 119 се прикажани резултатите од декомпозицијата на вертикалната компонента на поместувањата за подрачјето на село Раковец, добиени од комбинираното процесирање на растечката и опаѓачката орбита. Согласно легендата, стрелките насочени нагоре ги означуваат локациите со вертикално издигнување на површината, при што интензитетот на издигнувањето е прикажан со нијанси од светло до темно сина боја. Стрелките насочени надолу укажуваат на вертикално слегнување, при што интензитетот на движењето се зголемува со преминот од жолта кон темноцрвена боја. Зелените обележја претставуваат стабилни точки без значајни вертикални промени, односно делови од теренот кај кои не се забележани поместувања во висинска насока.

Резултатите од вертикалната декомпозиција покажуваат колоритна распределба на стрелките, кои се насочени во иста насока, што укажува на просторна варијабилност во интензитетот на вертикалните слегнувања на анализираното подрачје. Во северниот дел на селото доминираат зелени кругчиња, кои укажуваат на стабилна состојба без значајни вертикални поместувања, со исклучок на најсеверниот раб, каде се забележуваат локални слегнувања со просечна кумулативна вредност од приближно **2 cm** во анализираниот период. Наспроти тоа, повторно јужниот дел од селото се издвојува како зона со изразени поместувања, при што просечното кумулативно слегнување во овој дел изнесува околу **5 cm**. Највисоките вредности се регистрирани во југоисточниот дел од селото, каде максималните кумулативни слегнувања достигнуваат до **9 cm** во периодот од 2014 до 2025 година.

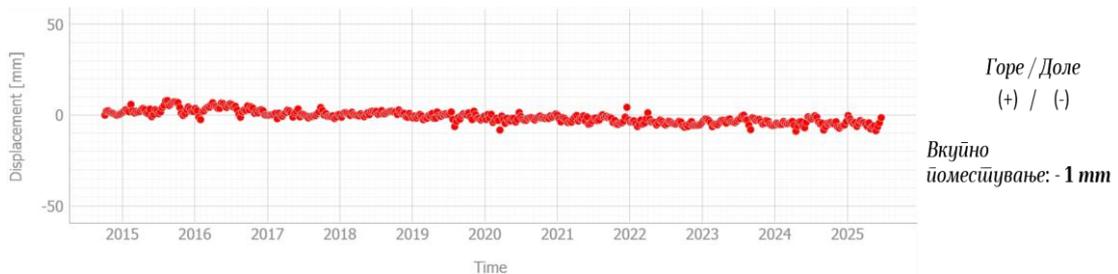
Овие резултати укажуваат на локализиран, но јасно изразен тренд на вертикални деформации, со тенденција на постепено зголемување на слегнувањата од север кон југ, што кореспондира со критичната зона идентификувана и во хоризонталната компонента на поместувањата.



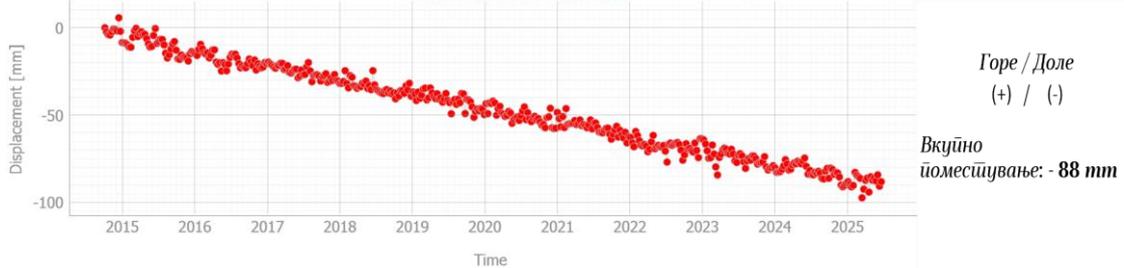
Слика 119 Приказ на вертикалната компонента и декомпозицијата во село Раковец

На Слика 120 се претставени временските серии на две карактеристични точки, една во северниот стабилен дел од селото во кој не се детектирани вертикални поместувања, а втората во југоисточниот дел каде се детектирани најголеми вертикални поместувања.

Временска серија на **стабилна** точка во северниот дел од селото



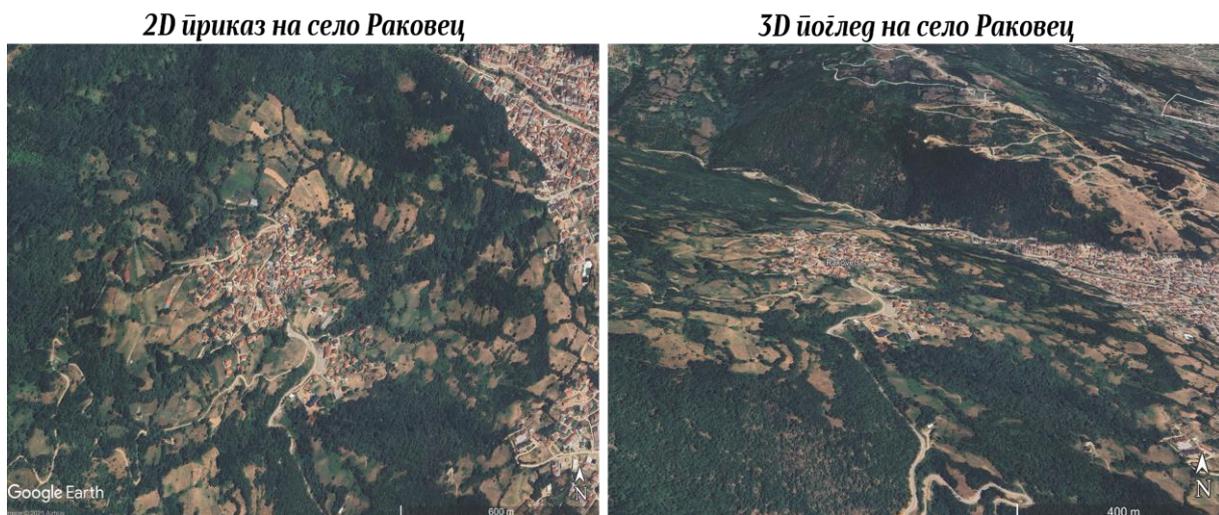
Временска серија на точка во **со тренд на слегнување** лоцирана во југоисточниот дел на селото



Слика 120 Приказ на временските серии на две точки во северниот и јужниот дел на село Раковец, добиени од декомпозираната вертикална компонента на поместување

Резултатите од декомпозицијата на поместувањата во источно-западната и вертикалната компонента укажуваат на јасна поврзаност со морфолошките карактеристики на теренот на кој е развиено селото Раковец. Како што може да се забележи од 3D приказот на теренот (Слика 121), северниот дел од селото е позициониран на помала висорамнина, која кон својот најсеверен раб преминува во падина ориентирана вертикално од југ кон север, каде и се забележуваат помали вертикални и источно насочени поместувања. Наспроти тоа, јужниот дел од селото, каде што се детектирани најинтензивните деформации особено хоризонталните поместувања кон исток, е развиен на поизразена косина со ориентација кон исток.

Ваквата топографска поставеност создава природен морфолошки контраст помеѓу стабилниот северен и јужен дел од селото. Таа воедно овозможува логично објаснување на детектираните источно насочени хоризонтални поместувања и помали вертикални слегнувања, чии највисоки вредности се концентрирани во југоисточниот сектор.



Слика 121 Просјорна појсјавеност и 3D појглед на појренот во кој е смесјено селото Раковец (Google Earth)

4.3.7 Дискусија на резултатите од InSAR анализите на Полошката Котлина и нејзината планинска околина

Резултатите добиени преку анализите со напредни InSAR техники овозможуваат целосна слика за просторната и временската динамика на деформациските процеси во Полошката Котлина и нејзината непосредна планинска околина. Комбинирањето на податоците од растечката и опаѓачката орбита, заедно со примена на PSInSAR и QPSInSAR техниките, овозможи високо доверливи резултати со прецизно дефинирани трендови на поместување.

Анализите спроведени врз целата Полошка Котлина покажуваат дека нејзиниот рамничарски дел се карактеризира со висока стабилност и минимални LOS поместувања во рамките на ± 1 mm/годишно. Оваа состојба на стабилност е забележана конзистентно во двете орбити, што укажува дека во урбаните и земјоделски зони на котлината не се активни значајни деформациски процеси. Овие резултати ја потврдуваат претпоставката дека котлинското дно, изградено претежно од слабо консолидирани кватернарни алувијални и делувијални наслаги, се одликува со мала градиентност и релативна механичка стабилност, што укажува на општа тектонска рамнотежа во анализираното подрачје.

Во контраст со стабилноста на котлината, на делови од падините на Шар Планина се забележуваат локализирани, но значајни деформациски појави. Тие се ограничени на релативно тесни зони, каде топографијата е изразена, а аголот на наклон на падините надминува 25° . *PSInSAR* анализата во двете орбити лоцираше значајни *LOS* поместувања во подрачјата на селата Селце и Раковец, лоцирани во долните планински појаси над котлината, односно во зоната каде планинскиот релјеф постепено преминува во котлинското подножје. За овие две населени места беа спроведени детални локално насочени *InSAR* анализи, при што покрај *PSInSAR* беа применета и *QPSInSAR* техниката, со цел да се добие подетална и поконзистентна слика за карактерот, интензитетот и насоката на деформациските процеси.

➤ *Детални InSAR анализи за поместувањата во село Селце*

Во околината на Селце, кое се наоѓа на надморска височина од приближно 820 m, *InSAR* анализите детектираа спротивно насочени *LOS* поместувања од двете орбити, концентрирани во влезниот дел на селото, кој претставува зона со најизразена деформациска активност. Резултатите од *PSInSAR* и *QPSInSAR* анализите покажаа висок степен на согласност, при што во критичната зона со растечката орбита се регистрирани поместувања насочени кон сателитот, со просечни кумулативни вредности од околу +10 cm за анализираниот период, што укажува на издигнување на површината во правецот на аквизиција. Во опаѓачката орбита, пак, се евидентирани негативни *LOS* поместувања, односно оддалечување од сателитот, со просечни кумулативни вредности од околу -20 cm, што укажува на слегнување на теренот во истиот просторен сегмент. Овие спротивно насочени *LOS* поместувања ја нагласуваат комплексноста на деформацискиот образец, поради што примената на декомпозиција на податоците е неопходна за појасна физичка интерпретација на реалните насоки и интензитети на поместувањата.

Резултатите од декомпозицијата јасно укажуваат дека влезниот сектор на селото Селце е најизразено подложен на поместувања. Во овој дел од селото, просечните кумулативни вредности на поместувања насочени кон запад изнесуваат околу 20 cm во анализираниот период, додека на поединечни локации се регистрирани максимални вредности што достигнуваат до 35 cm. Покрај тоа, во централното јадро на селото исто така се забележуваат хоризонтални придвижувања кон запад, но со значително мал интензитет (Слика 106). Во однос на вертикалните поместувања, најизразени слегнувања се евидентирани токму во влезниот сектор, со просечни вредности од околу 20 cm во анализираниот период, што укажува на постепен и долготраен процес на вертикална деформација. Во централниот дел на селото не се забележани значајни вертикални поместувања, што упатува на релативно стабилна состојба на тој дел од теренот (Слика 108).

Иако за подрачјето на Селце не располагаме со дополнителни геодетски или геотехнички податоци за потврда на стабилноста на теренот, фактот што од двете независни анализи, во растечка и опаѓачка орбита се добиени конзистентни резултати, укажува на висока доверливост на определените деформации. Дополнително, добиените резултати се во целосна согласност со морфолошките карактеристики на теренот, бидејќи селото е развиено на падина ориентирана приближно во насока југозапад-североисток, со постепено спуштање на теренот кон југозападната страна (Слика 110). Таквата топографска поставеност ја потврдува логичната поврзаност на детектираните хоризонтални поместувања кон запад и вертикалните слегнувања со морфолошките карактеристики на теренот, каде што најверојатно дејствуваат гравитациски процеси, можеби дополнително поттикнати од заситување на почвата со врнежи и локални ерозивни појави.

➤ **Детални InSAR анализи за поместувањата во село Раковец**

Селото Раковец, лоцирано на надморска височина од околу 790 m, претставува втората критична зона каде беа спроведени детални InSAR анализи. Резултатите од процесирањето на Sentinel-1 снимките од растечката и опаѓачката орбита открија локализирани, но конзистентни деформациски обрасци, најизразени во јужниот дел на селото.

Во анализите со снимки од растечката орбита беа идентификувани негативни LOS поместувања, со просечни кумулативни вредности во критичната зона од околу -9 cm и максимални кумулативни поместувања кај поединечни точки кои достигнуваат до -13 cm, што укажува на постепено оддалечување на површината од сателитот, односно на слегнување во правецот на аквизиција (Слика 112). Од друга страна, анализите со опаѓачката орбита покажаа позитивни LOS поместувања во истиот просторен сегмент. Просечните кумулативни поместувања во овој случај изнесуваат околу +5 cm, а максималните достигнуваат до +7 cm (Слика 115). Овие спротивно насочени LOS поместувања ја потврдуваат потребата од декомпозиција на податоците со цел добивање на реалната насока на движење.

Декомпозицијата на LOS поместувањата покажа дека најголем дел од анализираното подрачје, особено јужниот сектор на селото, е подложен на хоризонтални придвижувања насочени кон исток, со просечни кумулативни вредности од околу 12 cm, а максималните достигнуваат до 24 cm на неколку локации во анализираниот период (Слика 117). Во поглед на вертикалните деформации, најизразени слегнувања се регистрирани во југоисточниот дел од селото, со просечни слегнувања од околу 5 cm и максимални до 9 cm. Спротивно на тоа, северниот дел се карактеризира со релативна стабилност, со исклучок на северниот раб каде се забележани помали вертикални слегнувања до 2 cm во анализираниот период (Слика 119).

Морфолошката анализа на теренот (Слика 121) укажува дека селото Раковец е развиено на сложен релјефен профил каде северниот дел лежи на блага висорамнина која во својот северен раб преминува во наклон кон север, додека јужниот дел се наоѓа на падина со ориентација кон исток. Таквата топографска поставеност обезбедува логична морфолошка интерпретација на забележаните источно насочени хоризонтални поместувања и умерените вертикални слегнувања во југоисточниот дел на селото, каде е најголемата концентрација на детектирани деформации. Иако не располагаме со дополнителни геодетски или геотехнички мерења за потврда на стабилноста, добиените резултати од двете независни орбити се конзистентни и морфолошки оправдани. Поради тоа, се препорачува воспоставување на систем за геодетски мониторинг на геометриската стабилност на теренот и дополнителни геотехнички испитувања, со цел прецизно утврдување на причините и динамиката на забележаните деформации.

Во оваа студија на случај повторно се потврдува еден од клучните недостатоци на InSAR техниките, а тоа е ограничената можност за детекција на деформации во подрачја со густа и висока вегетација. Ова е особено изразено при користење на C-band податоци од Sentinel-1, чии радарски сигнали најчесто се расејуваат од горните делови на крошните на дрвјата, што предизвикува губење на кохерентност и намалена сигурност на резултатите во таквите зони.

Сепак, од резултатите на ова истражување се наметнува јасна потврда дека InSAR претставува единствена техника која овозможува просторно и временски континуиран мониторинг со висока точност на големи површини. Примената на овој пристап овозможи да се изврши сеопфатна процена на стабилноста на Полошката Котлина и нејзината поблиска планинска околина, при што беа идентификувани две критични подрачја со изразени деформациски процеси.

4.4 МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИ НА НАСИПНАТА БРАНА ЛИСИЧЕ

4.4.1 Карактеристики на насипната брана Лисиче

Браната Лисиче претставува насипна брана, односно хидротехничка конструкција изградена од насипен материјал, сместена во централниот дел на Република С. Македонија, на приближно 23 km западно од градот Велес. Таа е изградена на реката Тополка, која претставува десна притока на реката Вардар, при што со нејзиното задржување е оформено вештачко езеро со истоимениот назив Лисиче. Резервоарот има примарна функција за водоснабдување и наводнување, при што обезбедува вода за околу 60.000 жители во општините Велес и Чашка, како и за потребите на земјоделското производство во поширокото подрачје.

Со оглед на нејзината намена, браната е изведена како композитна конструкција со камен материјал и централно глинено јадро. Ваквиот тип на градежно решение овозможува оптимална стабилност на насипот и сигурна водонепропустливост, дури и при долготрајни хидродинамички оптоварувања. Изградбата на браната започнала во 1987 година, а нејзините основни технички карактеристики се следните:

- Должина на круната: 660 m.
- Максимална висина над теренот: 67 m.
- Ширина на круната: 8 m.
- Кота на круната: 428.5 m надморска височина [73].

Со изградбата на браната е формиран резервоар со површина од приближно 1 km² и вкупен капацитет на акумулацијата од околу 25 милиони m³, со што Лисиче се вбројува меѓу браните од средна големина во нашата држава.

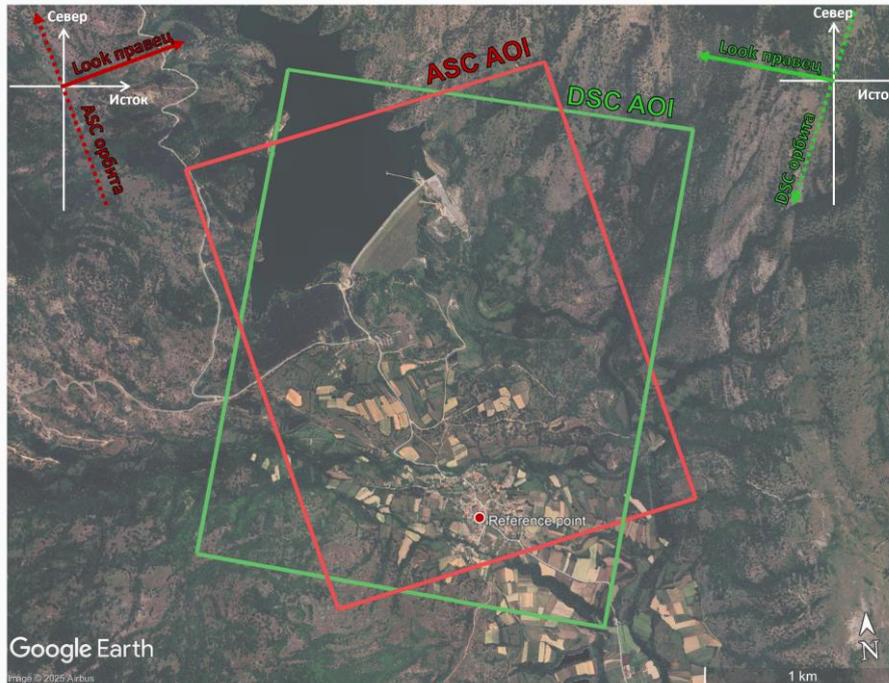


Слика 122 Просјорна постојаност и 3D поглед на брана Лисиче (Google Earth) [73]

Околниот терен има умерено планински карактер, со изразени падини и варијации во надморските висини. Според поедноставената геолошка карта (ОГК-500), поширокото подрачје околу браната Лисиче припаѓа на зони со доминантна застапеност на неогени седименти, кои локално се граничат со кредни карпи и гнајсеви. [83].

4.4.2 InSAR анализи со Sentinel-1 снимки на брана Лисиче

InSAR анализите за мониторинг на геометриската стабилност на браната Лисиче беа спроведени со користење на Sentinel-1 SLC податоци. Во обработката беа вклучени сите достапни снимки од растечката и опаѓачката орбита, опфаќајќи го периодот од октомври 2014 до февруари 2025 година. Просторниот опфат на анализираната површина околу браната, со јасно прикажани области покриени од двете орбитални геометрии, е претставен на Слика 123.



Слика 123 Приказ на анализираниите површини (AOI) околу брана Лисиче со Sentinel-1 во две орбити

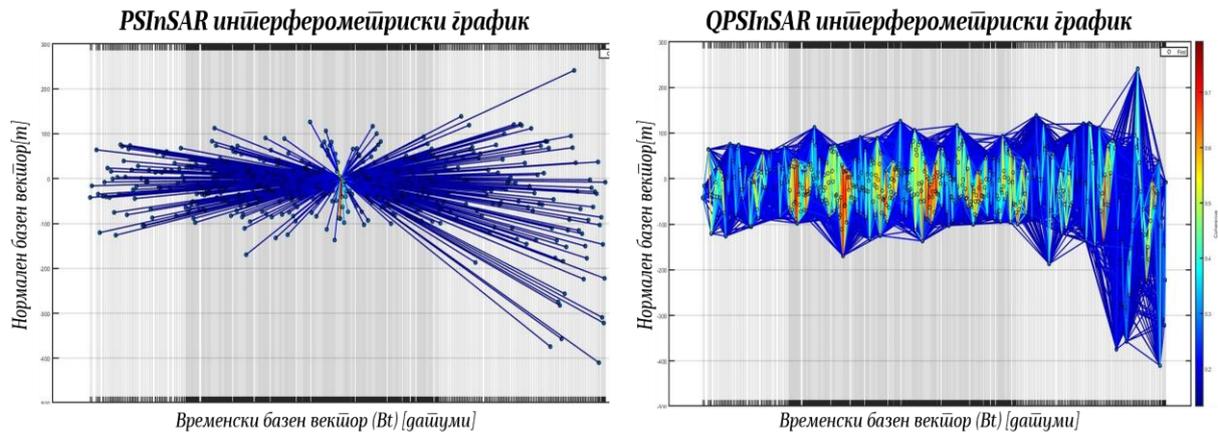
➤ InSAR процесирање на Sentinel – 1 снимки од растечка (ascending) орбита

Основните карактеристики на искористените Sentinel-1 снимки во растечката орбита за напредни InSAR анализи на брана Лисиче се прикажани во следната табела.

Табела 12 Основни карактеристики на користените Sentinel-1 снимки за анализа на брана Лисиче (растечка орбита)

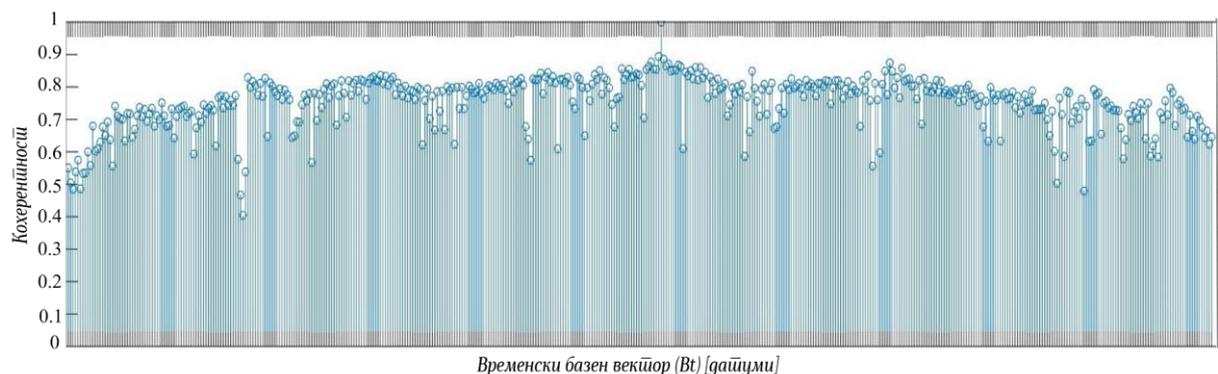
Број на SLC снимки	466
Анализиран временски период	Октомври 2014 – Февруари 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален пати	102
TOPS појас	IW 1
Агол на аквизиција (θ)	33.8°
Азимутален агол (α)	349.3°

Во рамките на анализата беше избрана примарната SAR снимка аквизирана на **15.12.2019 година**, во однос на која сите останати снимки беа корегистрирани со цел формирање на диференцијалните интерферограми. Интерферометриските мрежи при *PSInSAR* и *QPSInSAR* анализите за брана Лисиче од растечка орбита, се прикажани на *Слика 124*.



Слика 124 STAR график за *PSInSAR* (лево) и модифициран целосен график за *QPSInSAR* (десно) анализа

По формирањето на интерферометриските мрежи, како и вообичаено, следуваа низа на чекори поврзани со елиминација на орбиталната и топографската компонента од интерферометриската фаза, како и пресметка на индексот на амплитудна стабилност за секој пиксел. Атмосферската компонента (*APS*) беше определена врз основа на мрежа од *PS* кандидати кои беа селектирани врз база на комбиниран параметар што ги обединува амплитудната стабилност и просторната кохерентност, со вредност поголема од 1.60. На овој начин беа издвоени 225 *PS* кандидати со стабилни радиометриски и фазни карактеристики, кои овозможува сигурно атмосферско моделирање и елиминација на *APS* компонентата. Резултатите од тестот на кохерентноста по отстранување на *APS* за секоја снимка се прикажани на *Слика 125*.



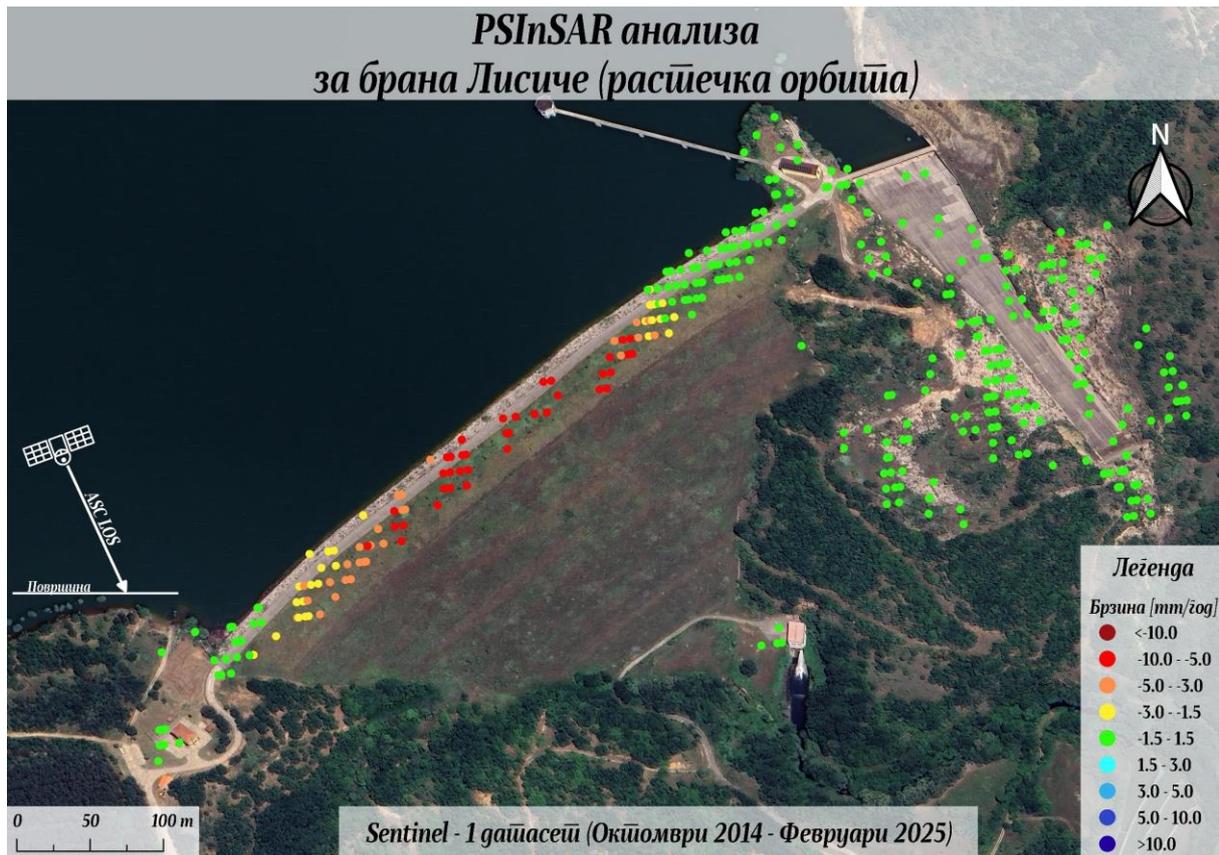
Слика 125 Тест на определеније *APS* за секоја користена снимка во анализата со користење на Sentinel - 1 снимки за брана Лисиче (*ascending* гајџејс)

По определувањето на *APS* за секоја снимка, се спроведоа просторно – временски моделирања користејќи ги *PSInSAR* и *QPSInSAR* техниките. Моделирањето се направи на сите точки на браната и мрежа од точки надвор од браната за кои критериум за селекција беше нивниот индекс на амплитудна стабилност да е поголем од 0.6. За референтна точка беше избрана точката со најголем индекс на амплитудна стабилност, чии координати се прикажани во *Табела 13*.

Табела 13 Координати на референцијата точка при InSAR анализите на брана Лисиче, со SAR снимките од растечката орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
250	27	41° 40' 36.37"	21° 36' 22.89"

Резултатите од *PSInSAR* анализата за брана Лисиче со снимки од растечката орбита се прикажани на Слика 126.

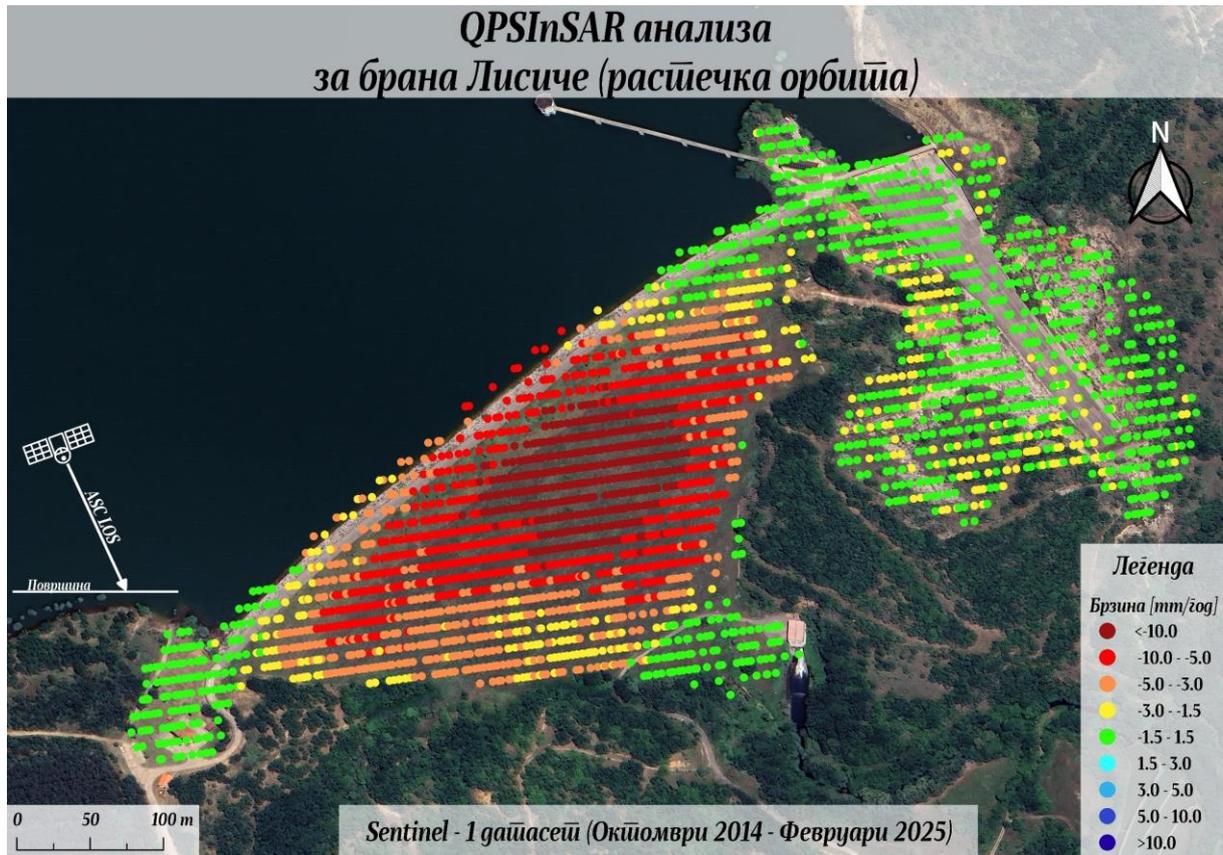


Слика 126 PSInSAR анализа за брана Лисиче, растечка орбита (Sentinel-1)

Во рамките на *PSInSAR* анализата со *Sentinel-1* снимки од растечка орбита за подрачјето на браната Лисиче беа идентификувани вкупно **393 PS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.73, што претставува одличен показател за конзистентноста на фазните временски серии. Како што е прикажано на Слика 126, PS точките се концентрирани по круната на браната и по карпестиот предел во непосредна близина на преливникот, каде што се обезбедени најстабилни услови за перманентно радарско расејување.

Во поглед на просторната распределба на резултатите, најизразени *LOS* поместувања се забележани во централниот дел на круната на браната, каде што максималните кумулативни вредности достигнуваат повеќе од **-10 cm** во правецот на аквизиција. Просечните кумулативни поместувања во овој сектор изнесуваат околу **-6.5 cm** за целиот анализиран период. Наспроти тоа, на краевите на круната и во зоната околу преливникот не се детектирани значајни *LOS* поместувања, што упутува на релативно стабилна состојба на овие делови од браната.

Резултатите од QPSInSAR анализата за брана Лисиче со снимки од растечката орбита се прикажани на Слика 127.



Слика 127 QPSInSAR анализа за брана Лисиче, расчечка орбита (Sentinel-1)

Резултатите од QPSInSAR анализата, изведена со Sentinel-1 снимки од растечка орбита, овозможуваат многу подетална и просторна слика за состојбата на браната Лисиче во споредба со PSInSAR анализата. Идентификувани се вкупно **2779 QPS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.84, што укажува на висок степен на сигурност на фазните временски серии и стабилност на добиените резултати. QPS точките се густо и рамномерно распределени по целото тело на браната, вклучувајќи ја круната, централниот дел и зоната околу преливникот, со што се овозможува прецизна процена на геометриската стабилност на конструкцијата. Највисоки вредности на темпорална кохерентност се регистрирани по должина на круната и средишниот дел на браната, додека во подножјето кохерентноста е нешто пониска, околу 0.7, но сепак укажува на задоволителен квалитет на сигналот.

Како што може да се забележи на Слика 127, најизразени LOS поместувања се детектирани во централниот дел на браната, каде што максималните кумулативни поместувања надминуваат **-19 cm** во правецот на аквизиција, додека просечните изнесуваат околу **-15 cm** за анализираниот период (2014–2025). Интензитетот на деформациите постепено опаѓа од централниот дел на браната кон краевите, каде има минимални поместувања, што укажува на градиентно намалување на деформациониот ефект. Минимални и незначителни поместувања се забележуваат и на површината околу преливникот, што потврдува дека овој дел од браната останува стабилен во текот на целиот анализиран временски период.

➤ **InSAR процесирање на Sentinel – 1 снимки од опаѓачка (descending) орбита**

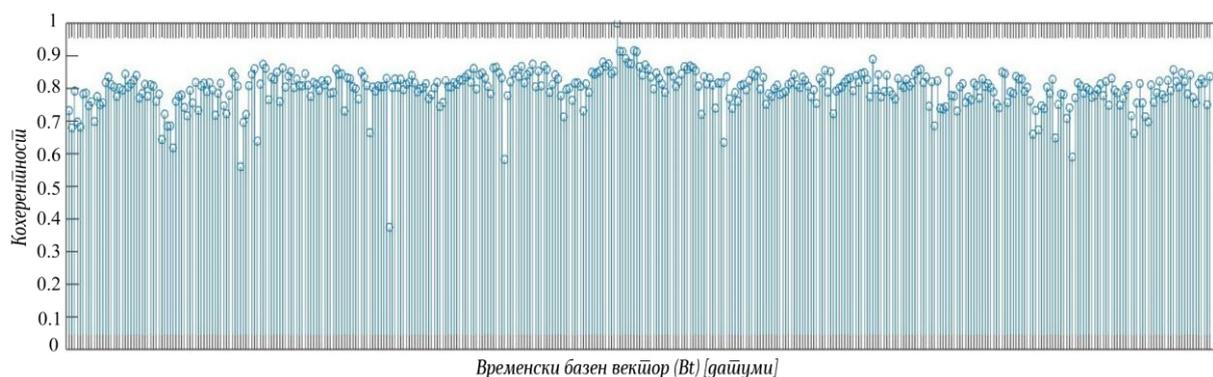
Основните карактеристики на употребените Sentinel-1 снимки во опаѓачка орбита за напредни InSAR анализи на брана Лисиче се прикажани во следната табела.

Табела 14 Основни карактеристики на користениите Sentinel-1 снимки за анализа на брана Лисиче (опаѓачка орбита)

Број на SLC снимки	456
Анализиран временски период	Октомври 2014 – Февруари 2025
Поларизација	VV
Број на орбитален пати	80
TOPS појас	IW 2
Агол на аквизиција (θ)	39.3°
Азимутален агол (α)	190.0°

Во рамките на анализата беше избрана примарната SAR снимка аквизирана на **27.09.2019 година**, во однос на која сите останати снимки беа корегистрирани со цел формирање на диференцијалните интерферограми. Интерферометриските мрежи при *PSInSAR* и *QPSInSAR* анализите за брана Лисиче од растечка орбита, се многу слични на оние од растечката орбита прикажани на *Слика 124*.

Атмосферскиот фазен прозорец (*APS*) беше моделиран со употреба на вкупно 147 *PS* кандидати, селектирани според комбиниран параметар што ги обединува индексот на амплитудна стабилност и просторната кохерентност, со вредност поголема од 1.60. Овие стабилни расејувачи овозможува прецизно моделирање и отстранување на атмосферското влијание во секоја од користените снимки, со што се обезбеди висока конзистентност на податоците за следните фази од анализата. Резултатите од тестот на кохерентноста по елиминацијата на *APS* за секоја снимка се прикажани на *Слика 128*.



Слика 128 Тест на определениите *APS* за секоја користена снимка во анализата со користење на Sentinel – 1 снимки за брана Лисиче (descending појас)

По определувањето на *APS* компонентата за секоја снимка, следеше просторно – временско моделирање со примена на *PSInSAR* и *QPSInSAR* техниките. Моделирањето беше извршено врз сите точки позиционирани на телото на браната, како и врз дополнителна мрежа од точки во нејзината

непосредна околина со индексот на амплитудна стабилност поголем од 0.6. За референтна точка беше избрана онаа со највисок индекс на амплитудна стабилност, лоцирана во близина на референтната позиција користена при анализата на растечката орбита. Нејзините координати се прикажани во Табела 15.

Табела 15 Координати на референтната точка при InSAR анализите на брана Лисиче, со SAR снимките од опаѓачка орбита

SAR координати		WGS 84 координати	
Range	Azimuth	Latitude	Longitude
106	135	41° 40' 36.66"	21° 36' 23.55"

Резултатите од PSInSAR анализата за брана Лисиче со снимки од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 129.



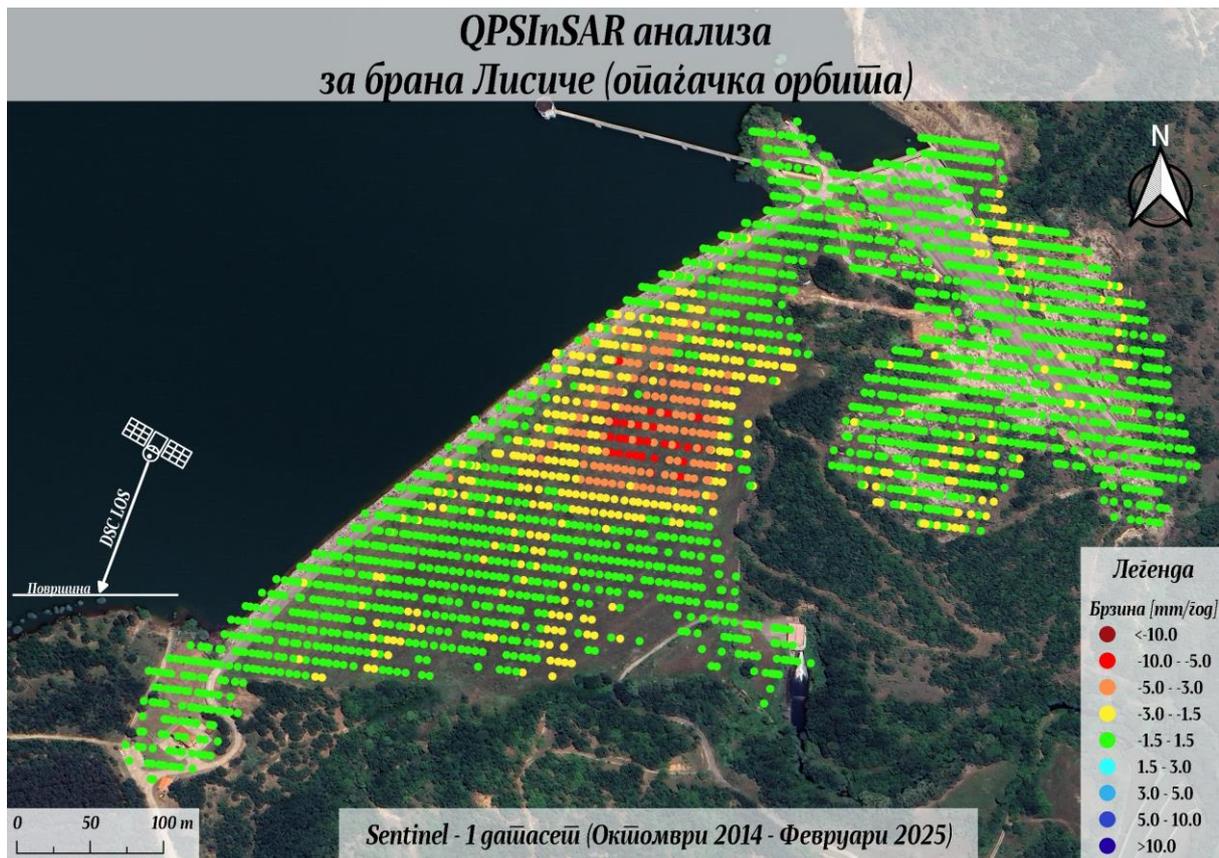
Слика 129 PSInSAR анализа за брана Лисиче, опаѓачка орбита (Sentinel-1)

Во рамките на PSInSAR анализата спроведена со Sentinel-1 снимки од опаѓачка орбита за подрачјето на браната Лисиче беа идентификувани вкупно **518 PS** точки со просечна темпорална кохерентност од 0.74, што покажува висок степен на конзистентност на фазните временски серии. Како и кај растечката орбита, PS точките се концентрирани главно по круната на браната и во карпестиот предел околу преливникот, каде што се обезбедени најповолни услови за стабилно и перманентно радарско расејување.

Во однос на резултатите, LOS поместувањата во опаѓачката орбита се значително помали во споредба со оние добиени од растечката орбита. Најизразени LOS поместувања се забележуваат во

средишниот дел на круната на браната, каде максималните кумулативни вредности достигнуваат нешто повеќе од -3 cm во правецот на аквизиција, додека просечните кумулативни поместувања во истиот сектор изнесуваат околу -2.5 cm за анализираниот период. Овие резултати ја потврдуваат конзистентноста на наодите добиени со растечката орбита, при што и во овој случај краевите на круната на браната и површината околу преливникот не покажуваат значајни деформации, што укажува на релативно стабилна состојба на овие делови од браната.

Резултатите од QPSInSAR анализата за брана Лисиче со снимки од опаѓачка орбита се прикажани на Слика 130.



Слика 130 QPSInSAR анализа за брана Лисиче, опаѓачка орбита (Sentinel-1)

Како и во случајот со растечката орбита, QPSInSAR анализата спроведена со Sentinel-1 снимки од опаѓачка орбита овозможува подетален увид во деформациското однесување и геометриската стабилност на браната Лисиче. Во рамките на анализата беа идентификувани вкупно **3685 QPS точки** со просечна темпорална кохерентност од 0.78, што претставува солиден показател за стабилноста на фазните временски серии и доверливоста на резултатите. QPS точките се густо распределени по целото тело на браната, со највисоки вредности на темпорална кохерентност долж круната и средишниот дел, додека во најдолните делови на браната кохерентноста е нешто пониска, но сепак останува над 0.7, што обезбедува доволна сигурност за интерпретација.

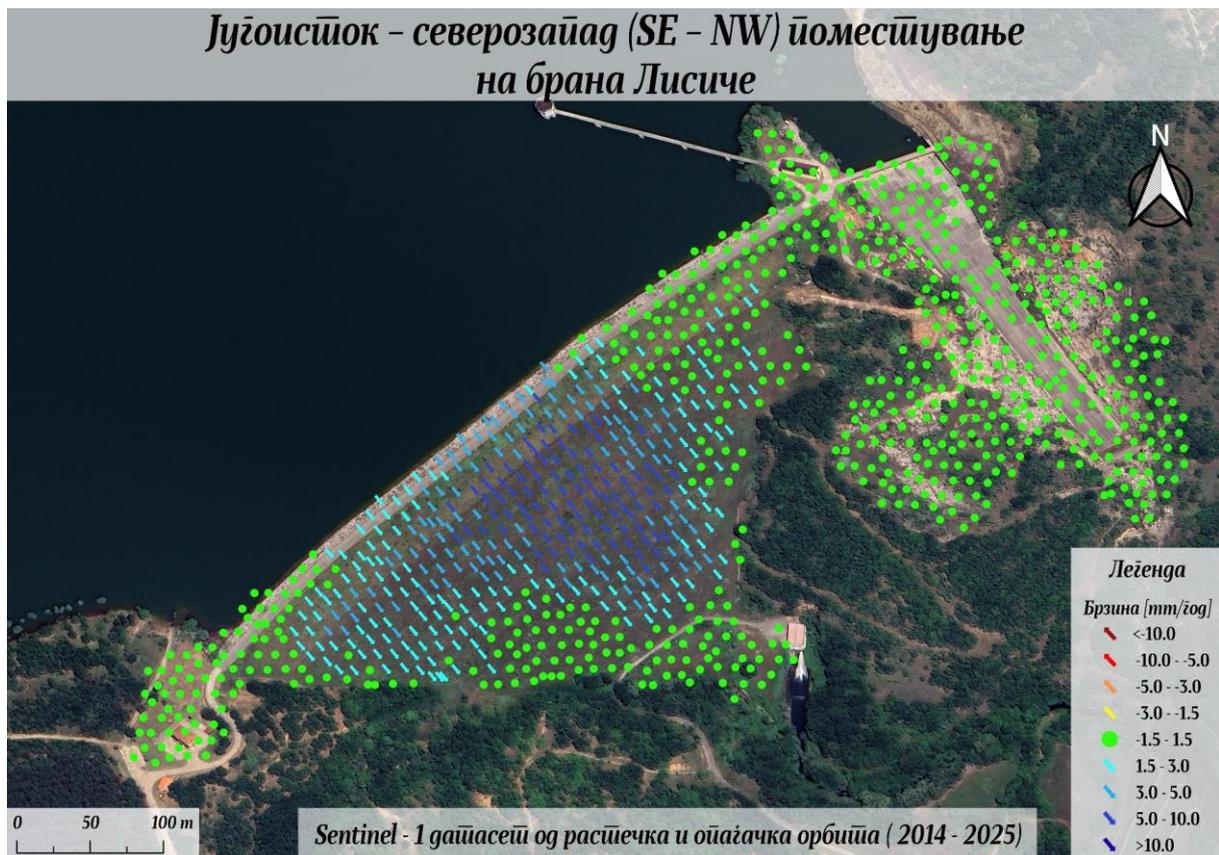
Во поглед на LOS поместувањата, резултатите покажуваат дека најголемите поместувања се концентрирани во средишниот дел на круната на браната, каде што максималните кумулативни вредности достигнуваат до -6 cm во правецот на аквизиција, додека просечните кумулативни поместувања во истиот сектор изнесуваат околу -4 cm за анализираниот период. Интензитетот на деформациите постепено се намалува кон краевите на круната и при контактот со природниот

терен, што укажува на јасен градиент на слабеење на деформацискиот ефект. Минимални и незначителни поместувања се забележуваат и околу преливникот, што повторно потврдува дека овој дел од конструкцијата останува стабилен низ целиот временски интервал на анализата.

За целосно и физички поинтуитивно толкување на добиените резултати од LOS поместувањата од растечката и опаѓачката орбита, потребно е да се изврши декомпозиција на деформациските компоненти. Овој процес овозможува раздвојување на измерените LOS вредности во две независни насоки на поместување – хоризонтална (источно–западна) и вертикална компонента. Во случајот со браната Лисиче, резултатите од источно–западната компонента на поместувањето треба да се проектираат на правецот кој е под прав агол во однос на круната на браната, бидејќи токму во таа насока се очекуваат најизразените хоризонтални деформации на нејзиното тело. Со оваа проекција се овозможува поавтентична процена на реалните поместувања на конструкцијата, особено во деловите каде се јавува концентрирање на деформациското поле.

4.4.3 Декомпозиција на LOS поместувањата на брана Лисиче во модифицирана источно–западна и вертикална компонента

За поинтуитивна претстава на поместувањата на браната направена е декомпозиција на LOS поместувањата од двете орбити во вертикална и модифицирана источно – западна компонента. Областа на униформно движење (RUM) е дискретизирана со квадратни ќелии со страна 6.8 m. На Слика 131 се претставени поместувањата од модификацијата на источно – западната компонента.



Слика 131 Приказ на модифицираната источно – западната компонента од декомпозицијата на LOS поместувањата за брана Лисиче

Модификацијата на источно-западната компонента во конкретниот случај со браната Лисиче е изведена со цел да се усогласи оваа компонента со реалниот правец на очекуваните поместувања (нормала на круната), источно-западната компонента е ротационо проектирана за агол од $+43^\circ$. Аголот е определен како нормала од азимутот на правецот помеѓу микротригонометриските точки 101 и 102, со проценета несигурност од $\pm 1^\circ$. Позитивната насока на проектираната хоризонтална компонента е дефинирана кон акумулацијата, негативна кон низводната страна.

Резултатите прикажани на Слика 131 покажуваат дека краевите на круната и долните делови од телото на браната не се евидентирани значајни хоризонтални поместувања, што укажува на нивна стабилност во текот на анализираниот период. Стабилна состојба е забележана и кај преливникот и карпестиот предел во неговата непосредна околина. Наспроти тоа, централниот дел на телото на браната, односно низводната зона, покажува најизразени хоризонтални деформации, при што максималните кумулативни поместувања, насочени од северозапад кон југоисток (спротивно од акумулацијата), достигнуваат до **9 cm** во текот на анализираниот период. Просечните кумулативни поместувања во оваа зона изнесуваат околу **5.5 cm**, што укажува на јасно дефиниран деформациски тренд ограничен на средишниот сегмент на браната.



Слика 132 Приказ на вертикалната компонента и декомпозицијата за брана Лисиче

Резултатите прикажани на Слика 132 ја претставуваат вертикалната компонента на поместувањата добиени со декомпозицијата на LOS поместувањата од двете орбити. Согласно легендата може да се забележи дека детектираните вертикални поместувања се со негативен предзнак, односно станува збор за слегнувања, најизразени во централниот дел на телото на браната, каде максималните кумулативни вредности достигнуваат **-13 cm**, што најверојатно укажува на постепен, но континуиран процес на консолидација на насипниот материјал.

Просечните слегнувања во централната зона изнесуваат околу **-11 cm**, при што интензитетот постепено опаѓа кон периферните делови на браната, иако мали слегнувања се присутни низ целата нејзина површина, со просечни брзини на поместувања од околу **-2 mm/годишно**. Во крајните делови на круната, како и во долните делови на низводната страна, не се забележани значајни вертикални деформации, што укажува на стабилна состојба на овие зони. Исто така, преливникот и неговата непосредна околина се карактеризираат со стабилно однесување без детектирани вертикални слегнувања во анализираниот период.

4.4.4 Геодетски мерења на брана Лисиче

Според законската регулатива во нашата држава, јавните претпријатија што стопанисуваат со брани имаат обврска најмалку еднаш годишно да спроведат геодетска оскулација, со цел следење на геометриската стабилност и безбедност на објектот. Во случајот со браната Лисиче, геодетски мерења се вршат редовно секоја година, а во одредени случаи и двапати годишно. Браната располага со микротрингометриска и нивелманска мрежа поставени надвор од телото на браната, која претставува референтна основа за следење на мерните точки поставени на телото на браната и придружните објекти. Преку овие високопрецизни геодетски мерења се утврдуваат хоризонталните и вертикалните поместувања на браната.

Процесот на геодетско следење на браната Лисиче претставува технички сложена и временски обемна постапка, при која мерењата обично траат неколку последователни денови и се изведуваат од повеќе екипи кои истовремено работат на различни делови од браната. Ваквата организација е неопходна поради големината и конструктивната комплексност на објектот, како и поради потребата од висока прецизност и синхронизација при изведбата на мерењата. Со оглед на тоа што браната Лисиче спаѓа меѓу поголемите и повисоки насипни брани во државата, нејзиниот мониторинг бара внимателно планирање и систематски пристап за да се обезбеди сигурна и долгорочна процена на нејзината геометриска стабилност.

За да се обезбеди временска усогласеност меѓу InSAR анализата и геодетските резултати, во споредбата се користени податоците од геодетските оскулации спроведени на браната Лисиче во периодот 2014–2024 година. Табела 16 ги прикажува датумите на мерењата и нивото на водата во акумулацијата за секоја поединечна кампања.

Табела 16 Геодетски оскулации на брана Лисиче во периодот 2014 – 2024 год.

Серија	Датум на мерење	Котна на вода [m]	Серија	Датум на мерење	Котна на вода [m]
(1)	11.2014	/	(10)	10.2020	417.6
(2)	12.2015	/	(11)	06.2021	421.8
(3)	11.2016	414	(12)	10.2021	415.0
(4)	12.2017	410	(13)	05.2022	422.5
(5)	08.2018	418	(14)	09.2022	414.0
(6)	12.2018	410	(15)	07.2023	422.0
(7)	06.2019	422	(16)	11.2023	411.0
(8)	11.2019	414.8	(17)	06.2024	421.0
(9)	06.2020	421.6	(18)	11.2024	410.0

➤ Положбени деформации на браната Лисиче со геодетски мерења

Следењето на деформациите на браната Лисиче се реализира преку две независни групи на геодетски мерења, едните насочени кон определување на положбените деформации, а другите кон следење на вертикалните деформации. Положбените деформации се определуваат како разлики на положбените координати (Y , X) на мерните точки добиени во повеќе последователни кампањи, реферирани во однос на микротригонометриската мрежа. Од оваа мрежа се изведуваат прецизни мерења на хоризонталните агли и должини кон мерните точки на телото браната и придружните објекти, со што се обезбедува конзистентност на резултатите низ времето. При секоја оскултација се добиваат координати во локален координатен систем, при што Y -оската е дефинирана со правецот на точките 101–102 од микромрежата, а X -оската е нормална на неа, со позитивна насока кон низводната страна, односно спротивно од акумулацијата (Слика 133).



Слика 133 Приказ на геодетската мрежа во локален координатен систем на браната Лисиче

Во периодот од ноември 2014 до ноември 2024 година, на браната Лисиче се изведени вкупно осумнаесет геодетски оскултации. За првата кампања, спроведена во 2014 година, не се достапни податоците за положбените координати, додека надморските висини се достапни од сите 18 оскултации и истите се искористени во анализите. Поради недостигот на податоци за првата кампања, за секоја мерна точка се располага со седумнаесет парови положбени координати (X , Y), што овозможува следење на нивното хоризонтално однесување во периодот од 2015 до 2024 година. Од понатамошната анализа се изземени точките поставени на возводната страна на браната (со ознаки од 70 до 89), бидејќи биле опфатени со мерења само во 2 кампањи.

Ориентацијата на X -оската од локалниот координатен систем, се совпаѓа со модификацијата на источно – западната компонента што претходно беше изведена при декомпозицијата на InSAR LOS поместувањата (Слика 131), во правец северозапад–југоисток, со што се овозможува директна и геометриски усогласена споредливост на резултатите од двете техники. Поради тоа, во понатамошната анализа се разгледуваат само промените на X -координатите на мерните точки од геодетските мерења, кои кореспондираат со проектираната хоризонтална компонента добиена од InSAR декомпозицијата.

Бидејќи InSAR резултатите се прикажани преку брзините на поместување, потребно е и геодетските мерења да се изразат во ист формат за да се овозможи усогласена и споредлива визуелна интерпретација. За таа цел, од сите добиени X -координати на секоја мерна точка во рамките на седумнаесетте геодетски оскултации, се пресметува линеарен тренд на промената со текот на времето. Најсоодветен пристап за оваа цел претставува линеарната регресија [9], која овозможува процена на средната годишна брзина на поместување согласно релација:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (67)$$

Каде:

v – Брзина на поместување [mm/год];

t_i – Време (во години) за секоја оскултација;

X_i – Координата на мерната точка во X -оската;

\bar{t} и \bar{X} – Средните вредности на времето и X -координатите, соодветно.

За оценка на точноста на пресметаните брзини, беше применета и стандардната девијација на регресијата, определена според следната релација:

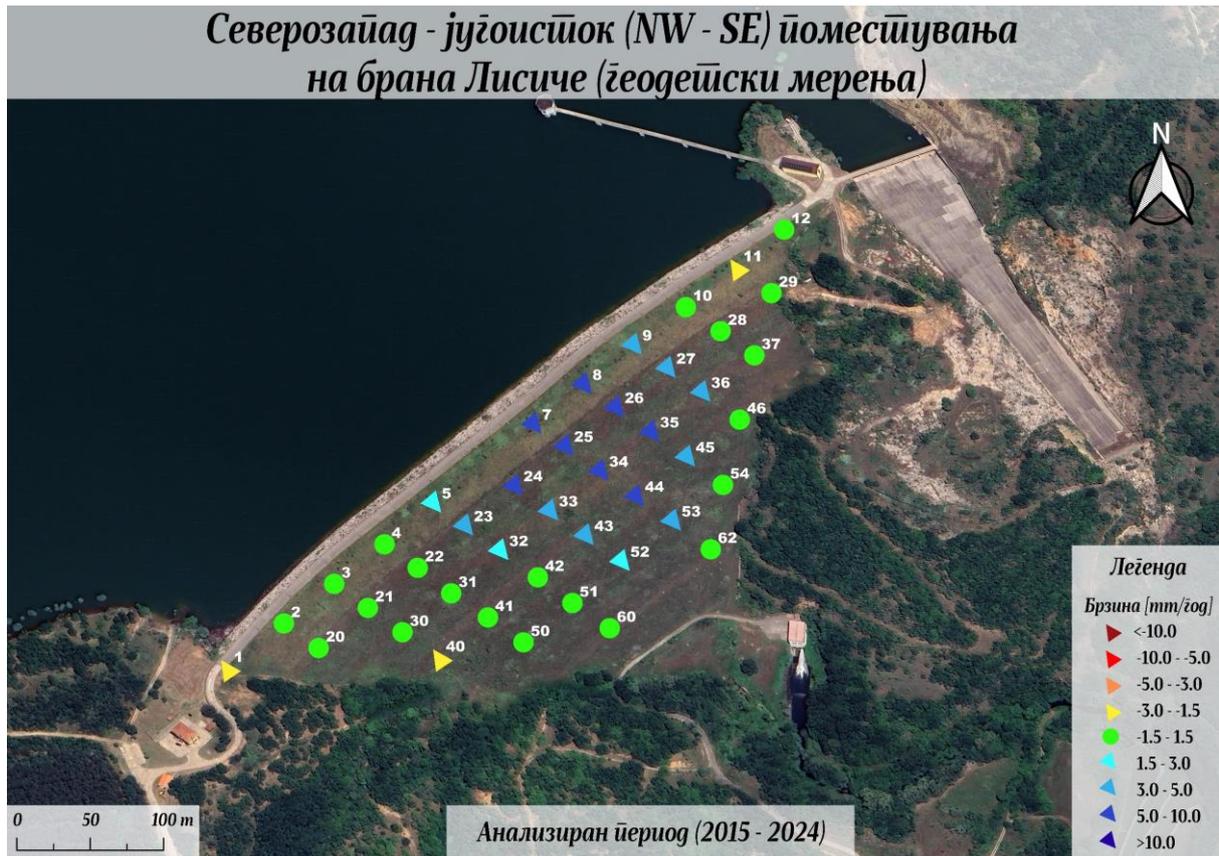
$$\sigma_v = \frac{\sigma_x}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (68)$$

Каде:

σ_x – Стандардна девијација на X -вредностите, односно резидуалите од регресиониот модел.

Пресметаните брзини на поместување за секоја поединечна мерна точка овозможуваат јасна слика за карактерот и интензитетот на хоризонталните деформации на браната во анализираниот период. Координатите на сите мерни точки од последната оскултација вклучително со пресметаните брзини на поместување со нивната стандардна девијација, се прикажани во 7.2 Прилог 2.

На Слика 134 е прикажана распределбата на брзините на хоризонталните поместувања на браната Лисиче, со што се овозможува појасна интерпретација на резултатите добиени од геодетските мерења. Според легендата, триаголниците ги означуваат мерните точки, а насоката на нивниот врв го прикажува правецот на движење, кон акумулацијата или во спротивна насока. Бојата ги претставува насоката и интензитетот на поместувањата, каде топлите нијанси (од жолга до темноцрвена) означуваат придвижувања кон акумулацијата, додека ладните (од светлосина до темносина) укажуваат на движења кон низводната страна на браната.



Слика 134 Приказ на поместувањата по X -оската на брана Лисиче од геодејски мерења

Како што може да се забележи од приказот на Слика 134, распределбата на хоризонталните поместувања укажува на јасно изразен деформациски образец во средишниот дел на телото на браната, каде се забележуваат доминантни придвижувања насочени спротивно од акумулацијата, односно кон низводната страна. Интензитетот на поместувањата варира во зависност од положбата на мерната точка. Најголемите поместувања се регистрирани во централниот дел на телото на браната, на точката 25, со максимално кумулативно поместување од **8 cm** во насока спротивна од акумулацијата. Во истиот сектор, просечните вредности изнесуваат околу **5.5 cm**, што претставува доминантен тренд на хоризонтално придвижување ограничен на средишната зона на браната. На краевите и бочните страни на браната не се евидентирани значајни хоризонтални деформации, што укажува на нивна стабилност во анализираниот период.

➤ Вертикални деформации на брана Лисиче со геодејски мерења

Вертикалните деформации на браната Лисиче се определуваат со примена на методата на прецизен геометриски нивелман, која овозможува исклучително висока точност при определување на надморските висини на мерните точки на браната. За да се добие динамичка претстава за однесувањето на браната низ времето, неопходно е, покрај апсолутните надморски висини, да се пресметаат и брзините на вертикалните поместувања. Во таа насока, беа искористени податоците од сите 18 геодетски оскултации спроведени во периодот од 2014 до 2024 година. Брзините на вертикално поместување и нивните оценки на точност беа определени според релациите (67) и (68), при што наместо координатата X беа употребени вредностите на надморските висини H и истите се приложени во 7.3 Прилог 3. На Слика 135 се претставени брзините на вертикалните поместувања.

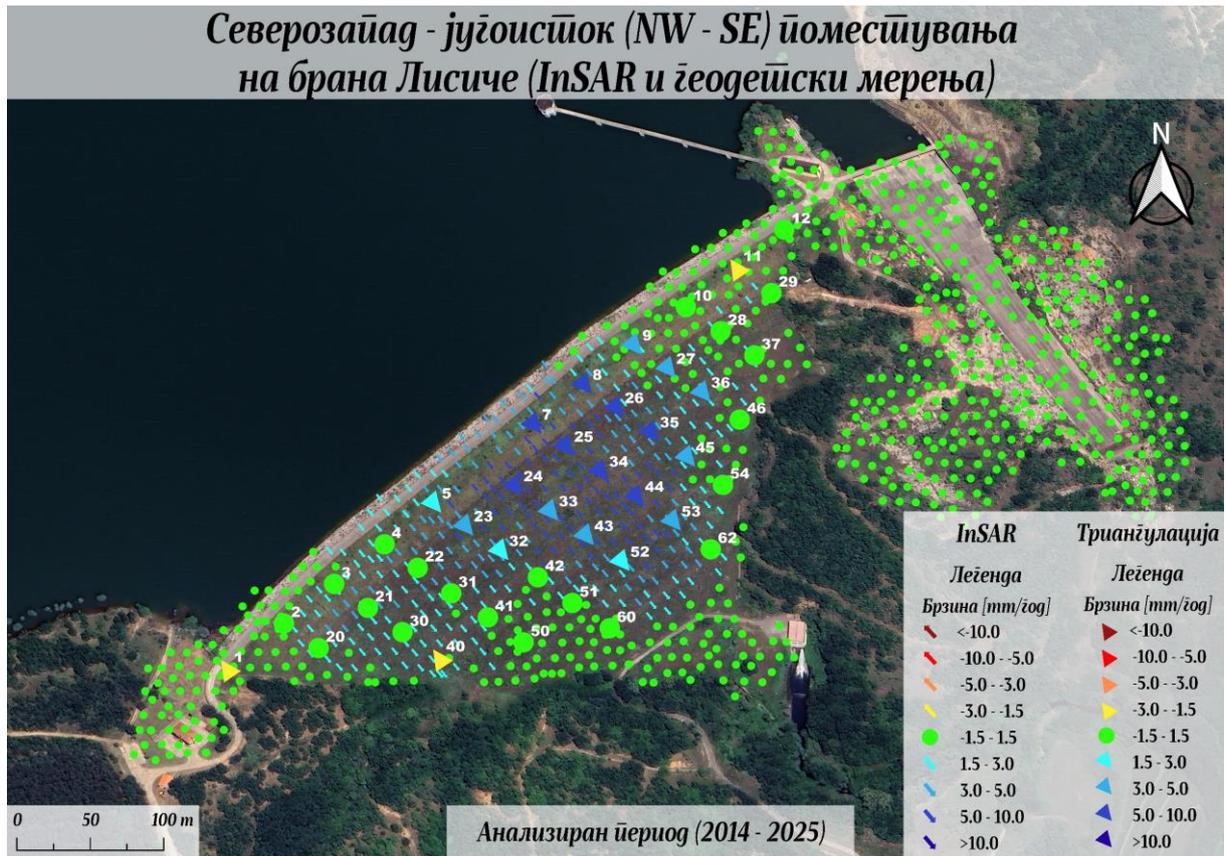


Слика 135 Приказ на вертикалните поместувања на брана Лисиче од геодејски мерења

Како што може да се забележи од приказот на Слика 135, резултатите од геодетските мерења укажуваат дека браната Лисиче во поглед на вертикалните деформации е стабилна во своите крајни и бочни зони, каде телото на браната се поврзува со природниот терен. Во овие делови не се регистрирани значајни вертикални движења, што укажува на добра конструктивна стабилност. Наспроти тоа, најизразени слегнувања се забележуваат во централниот дел од телото на браната, каде што максималното кумулативно поместување е регистрирано кај точката 35 и изнесува -12 cm за анализираниот период. Во пошироката централна зона просечните слегнувања се околу -10 cm , што укажува на континуиран, но очекуван процес на консолидација на насипниот материјал со текот на времето.

4.4.5 Анализа и споредба на деформациите добиени со InSAR и геодетски мерења

Целта на ова поглавје е да се процени веродостојноста на резултатите добиени со декомпозицијата на InSAR анализите преку нивна верификација со геодетските мерења, кои се третираат како референтни и условно точни резултати. Главната идеја е да се утврди нивото на усогласеност и конзистентност меѓу двата методолошки пристапи при определувањето на хоризонталните и вертикалните компоненти на деформациите на браната Лисиче. Поради тоа, сите резултати се прикажани преку брзини на поместување ($mm/год$), што овозможува директна и споредлива анализа на просторните деформациони обрасци добиени со двете техники. На Слика 136 се прикажани резултатите од споредбата на хоризонталните поместувања, поточно од поместувањата во правец северозапад – југоисток на брана Лисиче добиени од InSAR анализите и геодетските мерења.

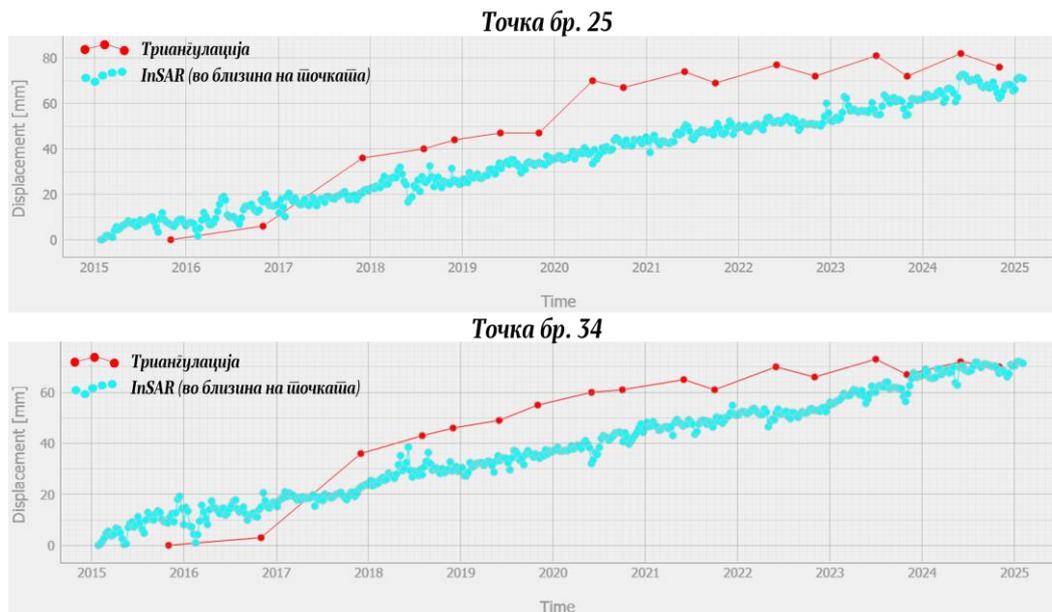


Слика 136 Резултатите од хоризонталните поместувања на брана Лисиче со InSAR и геодетски мерења

Од Слика 136 може да се забележи дека генерално постои висок степен на просторна согласност на брзините и насоките на хоризонталните поместувања добиени од InSAR анализите и геодетските мерења, бидејќи и двата методолошки пристапи укажуваат на јасно дефиниран деформациски максимум во централниот дел на низводната страна на браната, каде се евидентирани најголемите брзини на придвижување во насока спротивна од акумулацијата, како и релативно стабилна состојба на бочните страни.

Кај повеќето мерни точки се забележува висока согласност на трендовите на хоризонтално поместување, особено во зоните со најизразени деформации. На пример, точката 24 бележи просечна брзина на поместување од околу 6.5 mm/годишно според геодетските мерења, додека најблиските InSAR резултатите во нејзината околина покажуваат речиси идентична вредност од 6.3 mm/годишно. Слична согласност е забележана и кај точката 34, каде и InSAR и геодетските резултати укажуваат на брзина од околу 7.5 mm/годишно, како и кај точката 44, со 5.5 mm/годишно од геодетските мерења и приближно 5.2 mm/годишно од InSAR. Овие вредности потврдуваат дека во зоните со доминантна и континуирана деформација, резултатите од двата метода се високо конзистентни, што укажува на добра кореспонденција на просторните модели и интензитетите на движење. На Слика 137 се прикажани споредбите на временските серии на хоризонталните поместувања за две репрезентативни мерни точки, добиени со InSAR и геодетски мерења. За поголема целосност и прегледност, во 7.4 Прилог 4 (Споредби на временски серии на хоризонталните поместувања определени со InSAR и геодетски мерења) Прилог 4 се прикажани споредбените временски серии на сите мерни точки, кои овозможуваат директна

визуелна оценка на согласноста и динамиката на поместувањата добиени од InSAR анализата и геодетските мерења низ целата површина на браната.



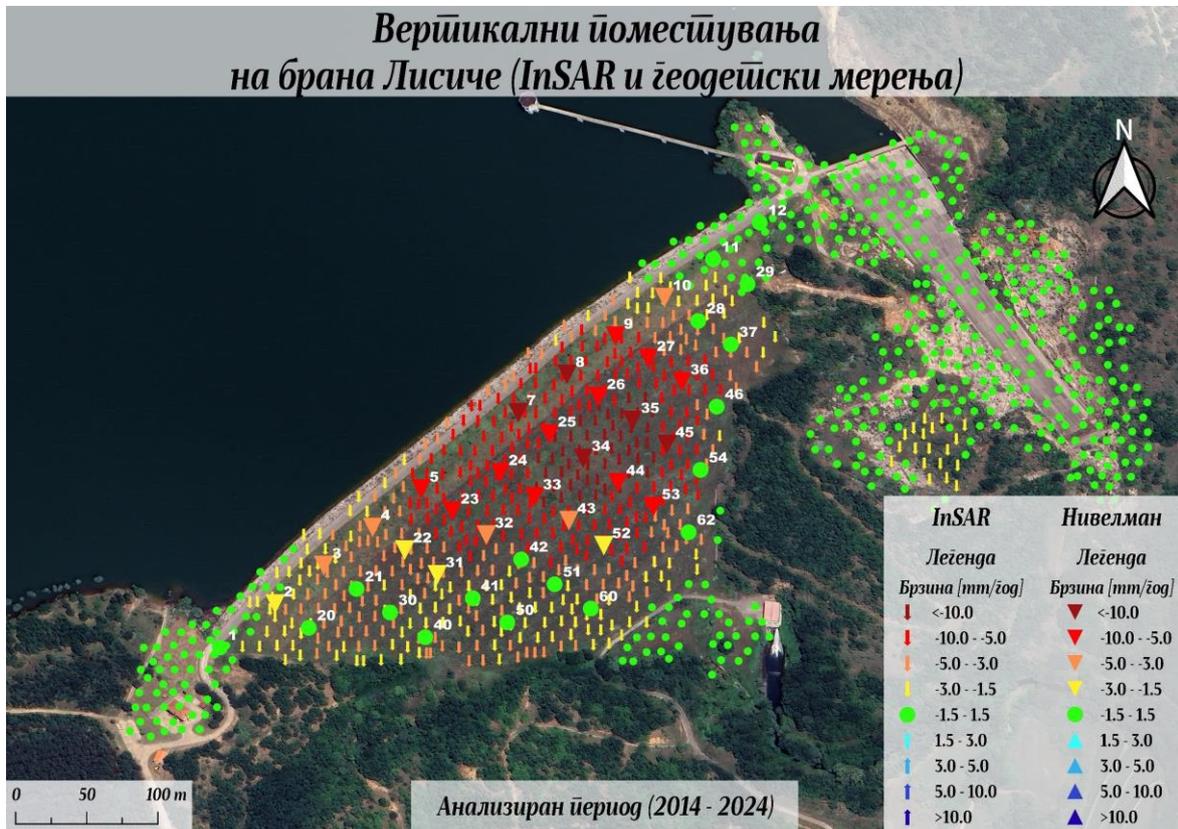
Слика 137 Споредба на временски серии на хоризонталниот поместувања на две тачки определени со InSAR и геодетски мерења

Врз основа на споредбата може да се констатира генерално висок степен на согласност помеѓу хоризонталните поместувања на браната Лисиче добиени со InSAR анализата и геодетските мерења, но кај поединечни мерни точки се евидентираат мали отстапувања, најчесто во опсег од 1 до 2 mm/годишно, кои не ја нарушуваат општата корелација меѓу резултатите од двата метода. Овие отстапувања се најизразени во југозападниот дел на браната, каде деформациите генерално се помали. Така, мерните точки: 4, 21, 22, 30 и 31, според геодетските мерења, покажуваат многу слаби или занемарливи хоризонтални поместувања, додека InSAR резултатите во нивната околина индицираат просечни брзини на хоризонтални поместувања во правец кон југоисток од околу 1.5 mm/годишно. Слична ситуација се забележува и кај точките: 1, 11 и 40, каде геодетските мерења регистрираат мали придвижувања кон акумулацијата од околу 1.5 mm/годишно, додека InSAR резултатите во нивната непосредна околина покажуваат стабилна состојба без значајни поместувања.

Овие мали несогласувања се очекувани и може да се објаснат со разликите во природата и просторната репрезентативност на двете методи. Имено, InSAR резултатите ја репрезентираат просечната реакција на површината во рамките на пикселот, чија декомпозиција во овој случај е изведена главно од QPS точки, додека геодетските мерења се однесуваат на конкретни материјализирани белези, кои можат локално да бидат под влијание на структурни или микродеформациски ефекти што не се репрезентативни за пошироката површина. Покрај овие фактори, одредено влијание врз резултатите имаат и ограничувањата на самата InSAR методологија, која во својата стандардна примена овозможува детекција на линеарни трендови на поместување во текот на анализираниот период. Иако теоретски е можно да се моделираат и нелинеарните поместувања, тоа е остварливо само во услови на висока кохерентност, што не е целосно исполнето во случајот со браната Лисиче поради вегетациската покривка на телото на браната. Дополнително, малите несогласувања може делумно да се должат и на систематски скок

на поместувањата забележан меѓу оскултациите во 2017 и 2018 година, присутен кај повеќето мерни точки (забележлив на Слика 137).

По анализата на хоризонталните компоненти на поместување, на Слика 138 е прикажана споредбата на просторната распределба на брзините на вертикалните поместувања добиени со InSAR и прецизен нивелман.

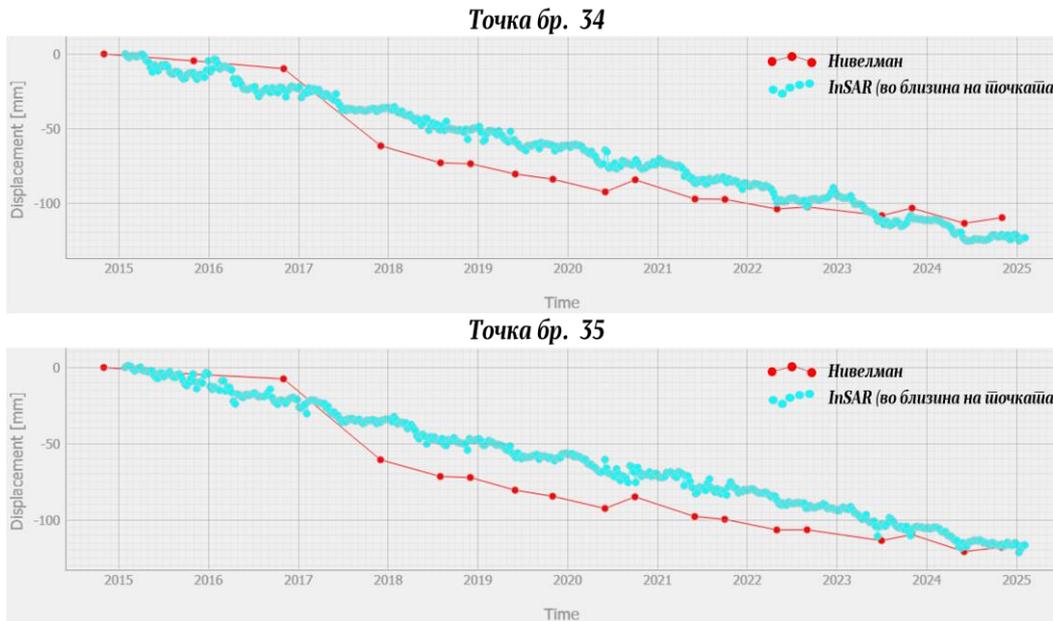


Слика 138 Резултатите од вертикалните поместувања на брана Лисиче со InSAR и геодетски мерења

Од Слика 138 може да се забележи дека генерално постои јасно изразена просторна кореспонденција на брзините и насоките на вертикалните поместувања добиени од InSAR анализите и геодетските мерења со прецизен нивелман, што укажува на висока усогласеност на двата методолошки пристапи во карактеризацијата на процесите на слегнување на браната. И двата сета на податоци конзистентно го прикажуваат централниот дел на низводната страна како зона со најголем интензитет на вертикални деформации, со брзини кои надминуваат **-10 mm/годишно**, при што поместувањата постепено се намалуваат со јасна градација кон бочните и крајните делови на браната, каде конструкцијата преминува во контакт со природниот терен.

Кај повеќето мерни точки се забележува висока согласност на трендовите на вертикално поместување, особено во зоните со најизразени слегнувања во централниот дел на низводната страна на браната. На пример, мерната точка 34 бележи просечна брзина на вертикално поместување од **-11.5 mm/годишно** според геодетските мерења, додека најблиските InSAR точки во нејзината околина покажуваат речиси идентична вредност од **-11.8 mm/годишно**. Слична согласност е забележана и кај точката 35, каде геодетските мерења укажуваат на брзина од **-12.1 mm/годишно**, а InSAR резултатите на **-11.8 mm/годишно**, како и кај точката 25, каде двете методи покажуваат еднакви брзини на поместувања од **-9.5 mm/годишно**. Останатите мерни точки во

централната зона, кои исто така регистрираат значителни слегнувања, покажуваат разлики помали од 1 mm/годишно меѓу InSAR и геодетските мерења, што укажува на исклучително висока конзистентност и просторна усогласеност на резултатите, потврдувајќи ја доверливоста на InSAR техниките при определување на деформациските трендови на вертикалните деформации. На Слика 139 се прикажани споредбите на временските серии на вертикалните поместувања за две репрезентативни мерни точки, добиени со InSAR и прецизен нивелман, додека приказите за останатите точки се презентирани во 7.5 Прилог 5.



Слика 139 Споредба на временски серии на вертикалните поместувања на две точки определени со InSAR и геодетски мерења (прецизен нивелман)

Иако и кај вертикалните поместувања генералниот впечаток укажува на висока конзистентност помеѓу резултатите добиени со InSAR техниките и со геодетските мерења, кај одделни мерни точки, особено во југозападниот дел на браната, се забележуваат мали разлики во интензитетот на брзините на слегнување. Овие разлики во најголем дел се движат во рамките од 2 до 2.5 mm/годишно и се евидентирани кај точки како: 21, 40, 41, 51 и 60, каде геодетските мерења укажуваат на нешто помали вредности на вертикални поместувања во однос на InSAR резултатите. Ваквите отстапувања, слично како и кај хоризонталните компоненти, можат да се објаснат со различната просторна репрезентативност на двете методи и со природата на самите мерења. Имено, геодетските мерења се однесуваат на материјализирани белеги поставени на површината на браната, додека InSAR резултатите ја претставуваат просечната линеарна реакција на површината на пикселот, чија декомпозиција во овој случај е изведена претежно од QPS точки. Овој пристап, иако обезбедува висока просторна покриеност, може делумно да влијае на точноста на резултатите во зони со помала густина на перманентни расејувачи и пониска кохерентност. Сепак, и покрај овие ограничени несогласувања, очигледна е високата нумеричка и просторна усогласеност на трендовите добиени со двете техники, особено во централната зона на браната каде се детектирани најголемите слегнувања, што потврдува дека InSAR методологијата со висока доверливост ги репродуцира реалните процеси на слегнување и хоризонтално поместување на браната Лисиче. Ова укажува дека методата може успешно да се користи како сигурен инструмент за долгорочно следење и оценка на стабилноста на насипни конструкции од ваков тип.

4.4.6 Дискусија на InSAR резултатите и нивна валидација со геодетски мерења за брана Лисиче

Резултатите од напредните InSAR анализи со *Sentinel-1* (растечка и опаѓачка орбита) обезбедуваат јасна, кохерентна и физички интерпретабилна слика за деформациското однесување на браната Лисиче во периодот 2014–2025. Декомпозицијата на LOS поместувањата во модифицирана хоризонтална компонента (нормална на круната, во правец СЗ–ЈИ) и вертикална компонента овозможи реална репрезентација на насоките и интензитетот на движењето, како и директна споредба со геодетските мерења. Притоа InSAR резултатите јасно укажуваат дека телото на браната се карактеризира со најизразени деформации во централниот дел на низводната страна, каде се регистрирани и најголемите хоризонтални и вертикални поместувања. Овие поместувања се очекувани за насипни брани бидејќи најверојатно се резултат на долгорочни процеси на консолидација на насипниот материјал и постепено прераспределување на напрегањата во телото на конструкцијата. Од друга страна, крајните делови на браната и нејзините контактните зони со природниот терен се издвојуваат како релативно стабилни сегменти, без детектирани значајни деформации. Ваквата просторна распределба е потврдена и со резултатите од геодетските оскултации, кои покажуваат сличен деформациски образец со изразено стабилни периферни делови и централна зона со највисок интензитет на придвижувања.

Во централната зона на низводната страна на браната Лисиче, InSAR анализите евидентираа максимални кумулативни хоризонтални поместувања насочени кон низводната страна од **9 cm** и просечни кумулативни вредности од околу **5.5 cm** во централниот дел на телото на браната за анализираниот период 2014–2025 (Слика 131). Геодетските мерења, спроведени во рамки на редовните оскултации, за истата зона прикажуваат максимални кумулативни хоризонтални поместувања од **8 cm** и просечни вредности од околу **5.5 cm** за периодот 2015–2024 (Слика 134), бидејќи положбените координати од кампањата во 2014 година не се достапни. Во однос на вертикалните поместувања, InSAR резултатите покажуваат максимални кумулативни слегнувања до **-13 cm** и просечни кумулативни слегнувања од околу **-11 cm** во централната зона на браната (Слика 132), додека геодетските мерења со прецизен нивелман регистрираа максимални кумулативни слегнувања од **-12 cm** и просечни кумулативни слегнувања од околу **-10 cm** за истиот сектор (Слика 135).

Имајќи ги на располагање резултатите од InSAR анализите и геодетските мерења, спроведена е детална компаративна анализа на деформациските обрасци добиени од двете мерни техники, изразени преку брзините на поместувања. Анализата се заснова на споредување на брзината на поместување на секоја мерна точка од геодетските мерења со најблиските InSAR резултати во нејзината околина, со цел да се процени нивната меѓусебна усогласеност и просторна конзистентност. Резултатите покажуваат висока согласност меѓу двата метода и јасна корелација на нивните деформациски трендови, особено во централната зона на низводната страна на браната, каде се регистрирани најизразените хоризонтални и вертикални деформации. Во таа зона, InSAR и геодетските мерења прикажуваат речиси идентични брзини на поместување и ги потврдуваат претходно изнесените деформациски трендови.

Сепак, при споредбата на поединечните мерни точки со нивните најблиски InSAR позиции треба да се има предвид дека ваквите споредби не се целосно оправдани. Причината за тоа лежи во разликите во природата и просторната репрезентативност на двете методологии, бидејќи InSAR резултатите ја претставуваат реакција на сите расејувачи во рамките на пикселот, додека

геодетските мерења се однесуваат на конкретни материјализирани белеги кои не значи дека секогаш се репрезентативни за пошироката површина. Дополнително, присуството на вегетациона покривка на телото на брана Лисиче значително ја намалува кохерентноста и го ограничува бројот и просторниот распоред на стабилни *PS* точки. Поради тоа, анализата на деформациите беше изведена со примена на *QPS* пристапот, при што телото на браната се анализираше врз основа на *QPS* точки (со исклучок на круната и зоната околу преливникот) кои се засноваат на дистрибуирано расејување (*DS*). Овој пристап овозможува многу подетална покриеност, но со намалена сензитивност кон помалите поместувања, што делумно објаснува зошто во југозападните делови на браната, каде деформациите се со низок интензитет, се забележуваат ограничени разлики меѓу брзините на поместување добиени од двете методи, најчесто во рамките од 1 до 2 *mm*/годишно.

Овие споредби би биле целосно оправдани и методолошки усогласени доколку на секоја геодетска мерна точка се инсталираат специјално дизајнирани радарски корнер рефлектори кои би служеле како трајни перманентни расејувачи за потребите на *InSAR* анализите. За таа цел, препорачливо е на секоја точка да се постават по два рефлектори, едниот насочен кон сателитите во растечка орбита, а другиот кон оние во опаѓачка орбита, со што би се овозможила директна и метрички прецизна споредба меѓу *InSAR* и геодетските мерења. За правилна примена на ваков систем потребно е да се изработи посебна студија насочена кон дефинирање на оптималната геометрија, ориентација и димензии на корнер рефлекторите, со цел нивна ефикасна употреба за различни сателитски платформи и фреквенциски опсези. Со воспоставување на ваков интегриран систем на мерење, споредбите меѓу *InSAR* и геодетските резултати би биле значително поефикасни и сигурни, а може со голема извесност да се очекува дека и малите разлики забележани во ова истражување ќе бидат целосно елиминирани.

Валидирањето на резултатите од *InSAR* анализите преку споредба со податоците од геодетските мерења овозможува поцврста процена и потврда за нивната точност и доверливост. Споредбата покажа дека *InSAR* методата, кога е соодветно применета и внимателно интерпретирана, може многу верно да ги репродуцира реалните деформациони обрасци и трендови на анализираната површина. Согласноста на резултатите во интензитетот, насоката и просторната распределба укажува дека оваа техника може да се смета за високо сигурна алатка за континуиран мониторинг на стабилноста на насипните брани. Притоа, *InSAR* обезбедува дополнителна предност пред останатите методи поради својата способност за ретроспективна анализа и густа просторна и временска покриеност на анализите, со што се овозможува навремено откривање на евентуални деформациони аномалии.

Сепак, *InSAR* не треба да се третира како замена за геодетските мерења, туку како нивно дополнување. Комбинирањето на двата методолошки пристапи создава интегриран систем кој овозможува прецизно и целосно следење на геометријата и динамиката на конструкцијата. Таквиот систем, кој ги спојува прецизните точности геодетски податоци со просторната сеопфатност на *InSAR* анализите, претставува идеален модел за современ мониторинг на брани и други критични инфраструктури. Во таа насока, добиените сознанија и успешната верификација на *InSAR* резултатите за браната Лисиче претставуваат солидна основа за примена на истата методологија и кај други брани во државата, особено кај оние со слична конструктивна типологија, каде ваквиот комбиниран пристап може значително да го подобри разбирањето на нивното долгорочно однесување и стабилност.

5. ЗАКЛУЧОК

Истражувањата претставени во оваа докторска дисертација опфаќаат теоретска, методолошка и апликативна разработка на современите *InSAR* техники, со особен акцент на напредните *PSInSAR* и *QPSInSAR*, како и на нивната примена за мониторинг на геодинамички процеси и инженерски објекти.

Во првиот дел од трудот, детално се обработени теоретските и математичките основи на *SAR* технологијата, принципите на *SAR* интерферометријата и напредните *InSAR* техники базирани на *PS* и *DS* пристапите. Овие поглавја претставуваат прва целосна систематизирана целина на оваа научна материја на македонски јазик, со можност да послужат како основен образовен и методолошки материјал за идни генерации истражувачи, наставници и студенти во полето на далечинската детекција и радарската интерферометрија. Ваквата сеопфатна теоретска рамка создава реална основа за нејзина интеграција како посебна тематска целина во наставната програма на предметот *Далечинска геодетекција*, во рамките на студиската програма по Геодезија при Градежниот факултет како и за подготовка на стручна литература на македонски јазик посветена на оваа тематика.

Воспоставената теоретска и методолошка рамка овозможи практична верификација на напредните *InSAR* техники преку нивно спроведување на три конкретни студии на случај, со што е демонстрирана нивната применливост во различни просторни услови. Апликативниот дел од истражувањето се заснова на три внимателно избрани подрачја кои опфаќаат различни просторни и функционални контексти: *урбан*, *рурален* и *инженерски*. На овој начин е обезбедена репрезентативна проценка на применливоста, точноста и ограничувањата на *InSAR* техниките за урбана и планинска средина како и за мониторирање на инженерски објект.

➤ *Мониторинг на деформации во урбаната зона на Скопската Котлина*

Првата студија на случај се однесува на следење на урбаната зона на Скопската Котлина, како најголем урбан и сеизмички активен регион во државата. Со користење на *Sentinel-1* и *TerraSAR-X* снимки беа добиени детални просторни и временски обрасци на деформации за анализираниот период (2014–2025). Резултатите покажаа доминантно стабилна состојба на целата котлина, со исклучок на локализирана зона на нестабилност во населбата Припор, каде е детектирана комбинација од хоризонтални и вертикални придвижувања над активните ископи на цементарницата „Усје“. Постигнатата согласност на резултатите помеѓу различните орбити (*Sentinel-1* и *TerraSAR-X*), фреквенциски опсези (*C-band* и *X-band*) и методолошки пристапи (*PSInSAR* и *QPSInSAR*) ја потврдува висока доверливост на резултатите. Притоа преку оваа студија на случај е демонстриран потенцијалот на *InSAR* за идно воспоставување на систем за рано предупредување и превентивен мониторинг во урбани зони, што претставува суштински придонес за управување со ризици во густо населени подрачја.

➤ *Мониторинг на деформации во Полошката Котлина и нејзината планинска околина*

Втората студија се однесува на Полошката Котлина и нејзината планинска околина, со цел да се испита применливоста на *InSAR* во комплексен топографски контекст со изразени падини и вегетационски покривки. Резултатите од анализите укажуваат на висока стабилност на рамничарскиот дел на котлината, каде не се детектирани значајни поместувања на површината.

Оваа состојба на стабилност е особено изразена во урбаните зони на градовите Тетово и Гостивар, како и во поголемиот дел од руралните населени места во котлината, каде анализите покажуваат минимални *LOS* поместувања во рамките на ± 1 mm/годишно.

Наспроти тоа, на падините на Шар Планина, во селата Селце и Раковец се идентификувани локализирани деформациски процеси, ограничени на релативно мали зони кои се карактеризираат со изразен наклон и сложена морфологија. Во овие две зони се идентификувани значајни хоризонтални и вертикални придвижувања, кои во целост кореспондираат со морфолошките карактеристики на теренот и укажуваат на гравитациски процеси и тивки свлечишта со долготраен карактер. Резултатите потврдија дека напредните *InSAR* техники овозможуваат временски континуирано следење со висока точност, што е особено значајно во планински подрачја каде традиционалните методи се тешко применливи. Ова истражување го демонстрира потенцијалот на *InSAR* како алатка за регионално следење на стабилноста на падините и навремена идентификација на ризични зони за навремено спречување на потенцијални последици од поголеми размери.

➤ *Мониторинг на деформации на насипна брана Лисиче*

Третата студија се однесува на мониторинг на насипната брана Лисиче, со цел да се оцени можноста за примена на *InSAR* при следење на стабилноста на овие хидротехнички објекти. Имајќи предвид дека браните претставуваат објекти од особено значење, кај кои можните поголеми деформации можат да имаат сериозни последици, нивното континуирано следење претставува не само техничка потреба, туку и законска обврска согласно националните прописи за безбедност и одржување на хидротехничките системи. *InSAR* анализите овозможуваат прецизна просторна карактеризација на деформациското однесување на браната, при што најизразени поместувања се забележани во централниот дел од низводната страна, додека бочните сегменти и контактните зони со природниот терен покажуваат стабилно однесување. Верификацијата на резултатите преку споредба со геодетските мерења покажа висока согласност во интензитетот, насоката и просторната распределба на детектираните хоризонтални и вертикални поместувања, што потврдува дека *InSAR* претставува значаен придонес кон постојните системи за мониторинг на брани, обезбедувајќи поширока просторна перспектива и можност за рано откривање на потенцијални деформациски аномалии.

Сублимирано, резултатите од трите студии на случај ја потврдуваат високата точност, доверливост и практична применливост на напредните *InSAR* техники. Оваа методологија овозможи идентификација на критични зони на нестабилност, прецизно следење на нивната еволуција низ времето и корелација со геоморфолошките и инженерските параметри. Добиените резултати имаат значаен научен и практичен придонес, потврдувајќи ја улогата на *InSAR* како сигурен инструмент за следење на земјини деформации и како основа за воспоставување на интегриран систем за мониторинг кој може да се применува од ниво на поединечни инженерски објекти до целата територија на државата.

Од сето ова може да се заклучи дека оваа дисертација го потврди потенцијалот на напредните *InSAR* техники како современ, прецизен и економичен инструмент за набљудување на геодинамиката на Земјината површина, при што ја поставува научната и методолошката основа за идни истражувања, наставни материјали и стручни прирачници во оваа област. Со тоа, истражувањето претставува пионерски чекор во систематизирањето и афирмирањето на *InSAR* во македонската научна и инженерска пракса.

Имајќи ги предвид добиените резултати и заклучоци, како и научниот и практичниот придонес на ова истражување, може да се издвојат неколку препораки кои се од суштинско значење за понатамошен развој на примената на *InSAR* во Република С. Македонија:

1. *Геодетско и геотехничко мониторирање на дејектираниите критични зони*

Со оглед на идентификуваните критични зони во скопската населба Припор и во планинските села Селце и Раковец во Полошката Котлина, се препорачува да се воспостави геодетски систем за редовна и детална геодетска оскултација на овие подрачја. Таквиот систем треба да обезбеди континуирано следење на хоризонталните и вертикалните поместувања со примена на прецизни геодетски мерења. Дополнително, неопходно е да се спроведат детални геотехнички истражувања со цел детектирање на причините за забележаните поместувања, вклучително и анализа на геолошките и хидрогеолошките услови. Резултатите од овие истражувања треба да овозможат целосна слика за состојбата на теренот и да дадат основа за дефинирање и навремено преземање на соодветни мерки за спречување на евентуални поизразени деформациски процеси во критичните подрачја.

2. *Примена на InSAR во редовниот мониторирање на наспинаната брана Лисиче*

Во однос на наспинаната брана Лисиче, се препорачува *InSAR* методологијата да се интегрира во програмата за редовен мониторинг на објектот како дополнителна алатка покрај постојната геодетска оскултација. Со тоа би се овозможило добивање на подетална слика за распределбата и интензитетот на деформациите по целата површина на браната и во нејзината околина. Дополнително, се препорачува поставување на корнер рефлектори покрај мерни точки на браната, со цел да се обезбеди повисока кохерентност во примената на *InSAR* напредните техники.

3. *Институционализирање на InSAR мониторирањето на национално ниво*

Се препорачува воспоставување на национален систем за *InSAR* мониторинг на геодинамичките процеси на територијата на Република С. Македонија. Овој систем треба да овозможи навремени сознанија за геодинамичките процеси во урбаните и руралните зони, како и на критичните инфраструктурни објекти (брани, патишта, железници, тунели и потпорни конструкции). Раната детекција на евентуални геодинамички процеси преку ваков систем може да послужи како алармен механизам за навремено превенирање на ризици и минимизирање на потенцијалните последици врз населението, инфраструктурата и животната средина.

4. *Развивање на стипендија за едукација и зајакнување на стипендиите капацитетите*

Се препорачува во рамките на студиите по геодезија и геоинформатика воведување на специјализирани предмети и лабораториски вежби за напредните *InSAR* техники и нивната примена. На тој начин би се обезбедило систематско стекнување на знаења и практични вештини за обработка, анализа и интерпретација на *InSAR* податоците. Имајќи го предвид растечкиот број на достапни *SAR* снимки и сè поголемиот потенцијал на оваа техника во геонауките и инженерството, овој пристап би овозможил создавање на соодветно обучен кадар подготвен за *InSAR* обработка и анализа на сателитски податоци и нивна практична примена во инженерските и научните истражувања.

6. КОРИСТЕНА ЛІТЕРАТУРА

- [1] Abo, H.O., Takahiro; Ge, Pinglan; Takahashi, Akira; Sakurazawa, Hiroki, (2023) *Application of PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data to Measure External Deformation of Rockfill Dam for Maintenance Management*, in *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2023*: Pasadena, California, USA.
- [2] Afzal, Z., T. Balz, and A. Asghar. (2024). Non-Linear PSInSAR Analysis of Deformation Patterns in Islamabad/Rawalpindi Region: Unveiling Tectonics and Earthquake-Driven Changes of article. *Remote Sensing*, 16(7), <https://doi.org/10.3390/rs16071194>
- [3] Bamler, R. (1998). Synthetic aperture radar interferometry of article. *Inverse Problems Synthetic aperture radar interferometry*, 14(4), R1–R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
- [4] Berardino, P.F., G.; Lanari, R.; Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- [5] Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. 7th. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] Bracewell, R.N. (1986). *The Fourier Transform and Its Applications*. 2nd. New York: McGraw-Hill.
- [7] Brown, L. (1999). *A Radar History of World War II: Technical and Military Imperatives*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- [8] Canada Centre for Remote Sensing / Canada Centre for Remote Sensing, N.R.C. (2009). *Fundamentals of Remote Sensing*. Retrieved, from https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- [9] Caspary, W.F. (1987). *Concepts of Network and Deformation Analysis*. 1st. Kensington, Australi: School of Surveying, University of New South Wales.
- [10] Casu, F.M., M.; Lanari, R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data of article. *Remote Sensing of Environment A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data*, 102(3–4), 195–210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.023>
- [11] Chen, C.W.Z., H. A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with statistical models for nonlinear optimization of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Two-dimensional phase unwrapping with statistical models for nonlinear optimization*, 39(8), 1834–1843. <https://doi.org/10.1109/36.942549>
- [12] Cigna, F.B., Maurizio; Novali, Fabrizio; Wegmüller, Urs; Colombo, Dario. (2025). Present-day land subsidence risk in the metropolitan cities of Europe from EGMS Sentinel-1 products of article. *Scientific Reports Present-day land subsidence risk in the metropolitan cities of Europe from EGMS Sentinel-1 products*, 15, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18941-8>
- [13] Ciuffi, P.G., B.; Cantone, L.; Crosta, C. (2024). InSAR stacking to detect active landslides and investigate long-term slow-moving processes over northern Italian Alps of article. *Remote Sensing of Environment InSAR stacking to detect active landslides and investigate long-term slow-moving processes over northern Italian Alps*, 3005, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113225>
- [14] Colesanti, C.F., A.; Prati, C.; Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers technique of article. *Engineering Geology Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers technique*, 68(1-2), 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3)

- [15] Costantini, M. (1998). A novel phase unwrapping method based on network programming of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* A novel phase unwrapping method based on network programming, 36(3), 813–821. <https://doi.org/10.1109/36.673674>
- [16] Crosetto, M., et al. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review of article. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Persistent Scatterer Interferometry: A review, 115(78-89). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- [17] Ćulumoska-Gjorgjievska, A.S., T.; Šajn, R. (2015). Spatial distribution of chemical elements in soils in the Polog Region, Republic of Macedonia of article. *Geologica Macedonica* Spatial distribution of chemical elements in soils in the Polog Region, Republic of Macedonia, 29(2), 155-166.
- [18] Cumming, I.G.W., F. H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Boston, MA: Artech House.
- [19] Curlander, J.C. and R.N. McDonough. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing: Wiley.
- [20] DARES. (2025). What is InSAR used for? . Retrieved, from <https://dares.tech/how-to-read-insar-data-for-monitoring-ground-displacement/>
- [21] De Luca, C.Z., I.; Manunta, M.; Casu, F.; Manzo, M.; Pepe, A.; Lanari, R. (2017). The Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS) approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: Algorithm description and products quality assessment of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* The Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS) approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: Algorithm description and products quality assessment, 55(10), 5293-5310. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2705385>
- [22] Debevec Jordanova, G.P., Z.; Yastika, P. E.; Oštir, K.; Verbovšek, T. (2024). SBAS DInSAR and in situ monitoring of the Šumljak landslide (SW Slovenia) dynamics driven by rainfall and piezometric-level fluctuation of article. *Landslides* SBAS DInSAR and in situ monitoring of the Šumljak landslide (SW Slovenia) dynamics driven by rainfall and piezometric-level fluctuation, 22(1397-1411). <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02408-4>
- [23] DLR-German Aerospace Center. (2025). TerraSAR-X / TanDEM-X Mission Overview. Retrieved, from <https://www.dlr.de/en/tsx>
- [24] DLR Online live tutorial (SAR course). (2023). Experimental SAR course: Live Tutorial. Retrieved, from Online live tutorial, not recorded (unpublished)
- [25] Doin, M.P.L., C.; Peltzer, G.; Cavalié, O.; Doubre, C. (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models, 69(1), 35-50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.010>
- [26] Donlon, C.J., et al. (2021). The Copernicus Sentinel-6 mission: Enhanced continuity of satellite sea level measurements from space of article. *Remote Sensing of Environment* The Copernicus Sentinel-6 mission: Enhanced continuity of satellite sea level measurements from space, 258(<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112395>)
- [27] Dumurdzanov, N.S., Todor; Burchfiel, B. Clark (2005). Cenozoic tectonics of Macedonia and its relation to the South Balkan extensional regime of article. *Geosphere* Cenozoic tectonics of Macedonia and its relation to the South Balkan extensional regime, 1(1), 1-22. <https://doi.org/10.1130/GES00006.1>
- [28] ESA-European Space Agency, (1997) *ERS-1/2 Mission and System Overview*: Noordwijk, The Netherlands.
- [29] ESA-European Space Agency. (2016). Sentinel-1 User Guide. Retrieved, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
- [30] ESA-European Space Agency, (2019) *Sentinel-1 Product Specification (S1-RS-MDA-52-7440, Issue 3/9)*: Paris, France.
- [31] ESA-European Space Agency. (2025). Copernicus DEM – Global and European Digital Elevation Model. Retrieved, from <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> Official

- Copernicus Data Space Ecosystem page describing the Copernicus DEM product (EEA-10, GLO-30, GLO-90).
- [32] European Commission. (2024). Copernicus Sentinel-1. Retrieved, from <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-sentinel-1>
- [33] Farr, T.G.R., P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D.; Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): Mission overview and assessment of data products of article. *Reviews of Geophysics The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): Mission overview and assessment of data products*, 45(2), <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- [34] Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space*. EAGE Publications bv.
- [35] Ferretti, A., et al. (2007). *InSAR principles*. Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications.
- [36] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Permanent scatterers in SAR interferometry*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [37] Ferretti, A., et al. (2007). Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation*, 45(5), 1142–1153. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.894440>
- [38] Ferretti, A.F., A.; Novali, F.; Prati, C.; Rocca, F.; Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR*, 49(9), 3460–3470. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
- [39] Ferretti, A.P., C.; Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*, 38(5), 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- [40] Flynn, T.J. (1997). Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity of article. *Journal of the Optical Society of America A Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity*, 14(10), 2692–2701. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.002692>
- [41] Fornaro, G.R., D.; Verde, S. (2012). Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multi-temporal SAR interferometry of article. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multi-temporal SAR interferometry*, 9(4), 648–652. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2172180>
- [42] Franceschetti, G. and R. Lanari. (1999). *Synthetic Aperture Radar Processing*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [43] G. G. Gisinger, C.R., M. Wecklich, S. Fritz, A. Wessel, M. Huber, A. Wendleder, and M. Eineder. (2021). The Copernicus DEM – A new global digital elevation model derived from TanDEM-X of article. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences The Copernicus DEM – A new global digital elevation model derived from TanDEM-X*, V-3-2021(285–292). <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2021-285-2021>
- [44] Gabriel, A.K.G., R. M.; Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry of article. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry*, 94(B7), 9183–9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
- [45] Ghaderpour, E.M., Paolo; Bozzano, Francesca; Scarascia Mugnozza, Gabriele. (2024). Ground deformation monitoring via PS-InSAR time series: An industrial zone in Sacco River Valley, Central Italy of article. *Remote Sensing Applications: Society and Environment Ground deformation monitoring via PS-InSAR time series: An industrial zone in Sacco River Valley, Central Italy*, 34(<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101191>)

- [46] Ghiglia, D.C. and M.D. Pritt. (1998). Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. 1st. New York: Wiley-Interscience.
- [47] Ghiglia, D.C.R., L. A. (1994). Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods of article. Journal of the Optical Society of America A Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods, 11(1), 107–117. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.000107>
- [48] Goldstein, R.M., Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications of article. Geophysical Research Letters Radar interferogram filtering for geophysical applications, 25(21), 4035–4038. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- [49] Goldstein, R.M., H.A. Zebker, and C.L. Werner. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping of article. Radio Science Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, 23(4), 713–720. <https://doi.org/10.1029/RS023i004p00713>
- [50] Goodman, J.W. (1976). Some fundamental properties of speckle of article. Journal of the Optical Society of America (JOSA) Some fundamental properties of speckle, 66(11), 1145–1150. <https://doi.org/10.1364/JOSA.66.001145>
- [51] Graham, L.C. (1974). Synthetic interferometer radar for topographic mapping of article. Proceedings of the IEEE Synthetic interferometer radar for topographic mapping, 62(6), 763–768. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9516>
- [52] Griffiths, D.J. (2017). Introduction to Electrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press.
- [53] Hannsen, R.F. (2001). RADAR INTERFEROMETRY: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [54] Hecht, E. (2016). Optics. 5th. Boston: Pearson.
- [55] Ho Tong Minh, D., R. Hanssen, and F. Rocca. (2020). Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives of article. Remote Sensing Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives, 12(9), <https://doi.org/10.3390/rs12091364>
- [56] Hooper, A., (2006) *PERSISTENT SCATTERER RADAR INTERFEROMETRY FOR CRUSTAL DEFORMATION STUDIES AND MODELING OF VOLCANIC DEFORMATION*, in *Degree of doctor of philosophy* Stanford university.
- [57] Hooper, A.B., D.; Spaans, K.; Arikani, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation of article. Tectonophysics Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, 514–517(1–13), <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- [58] Ishimaru, A. (1997). Wave Propagation and Scattering in Random Media. Reprint Edition (2 Volumes Bound as One). New York: IEEE Press and Oxford University Press.
- [59] ISRO - Indian Space Research Organisation. (2025). NASA-ISRO SAR (NISAR) Mission. Retrieved, from <https://www.isro.gov.in/NISAR.html>
- [60] Jackson, J.D. (1998). Classical Electrodynamics. New York: Wiley.
- [61] Jänichen, J.D.B., José Manuel; Huber, Martin; et al. (2025). Towards Operational Dam Monitoring with PS-InSAR and Electronic Corner Reflectors (ECR) of article. Remote Sensing Towards Operational Dam Monitoring with PS-InSAR and Electronic Corner Reflectors (ECR), 17(7), <https://doi.org/10.3390/rs17071318>
- [62] Kampes, B.M. (2006). Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- [63] Knott, E.F.S., J. F.; Tuley, M. T. (2004). Radar Cross Section. 2nd. Raleigh, NC: SciTech Publishing.
- [64] Krieger, G.M., A.; Fiedler, H.; Hajnsek, I.; Werner, M.; Younis, M.; Zink, M. (2007). TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry of article. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry, 45(11), 3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>

- [65] Krieger, G.Z., M.; Bachmann, M.; Bräutigam, B.; Schulze, D.; Martone, M.; ... Moreira, A. (2013). TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites of article. *Acta Astronautica* TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites, 89(83–98). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.03.008>
- [66] Lanari, R.C., F.; Manzo, M.; Zeni, G. (2004). An overview of the Small Baseline Subset (SBAS) approach for time-series analysis of SAR interferometric data of article. *Pure and Applied Geophysics* An overview of the Small Baseline Subset (SBAS) approach for time-series analysis of SAR interferometric data, 161(11–12), 2005–2027. <https://doi.org/10.1007/s00024-004-0192-9>
- [67] Lange, J.L., Tatjana. (2022). Fourier Series of chapter. In (Ed.), *Fourier Transformation for Signal and System Description* (pp. 9–19). Springer.
- [68] Lee, J.S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [69] Lenardón Sánchez, M.F., C. A.; Cigna, F. (2024). Multi-Decadal Land Subsidence Risk Assessment at Major Italian Cities by Integrating PSInSAR with Urban Vulnerability of article. *Land Multi-Decadal Land Subsidence Risk Assessment at Major Italian Cities by Integrating PSInSAR with Urban Vulnerability*, 13(12), <https://doi.org/10.3390/land13122103>
- [70] Li, J.Z., Yaqi; Yu, Dan; Ma, Weiyu. (2025). Study on Ground Deformation Monitoring in Xiong'an New Area from 2021 to 2023 Based on DS-InSAR of article. *Open Geosciences* Study on Ground Deformation Monitoring in Xiong'an New Area from 2021 to 2023 Based on DS-InSAR, 17(1), <https://doi.org/10.1515/geo-2025-0880>
- [71] Li, Z.F., E. J.; Cross, P. (2006). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, and InSAR integration of article. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, and InSAR integration, 111(B2), <https://doi.org/10.1029/2005JB003711>
- [72] Lisice, J. (2025). Историја на брана Лисиче. Retrieved, from https://jpvlisice.mk/?page_id=68&lang=mk
- [73] Lu, Z. and D. Dzurisin. (2014). *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes Monitoring a Volcanic Arc from Space*. Chichester, UK: Springer.
- [74] Manunta, M.L., R.; Casu, F. (2007). Improved SBAS-DInSAR analysis based on a global optimization approach of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Improved SBAS-DInSAR analysis based on a global optimization approach, 45(9), 2774–2787. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.898449>
- [75] Massonnet, D., et al. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry of article. *Nature* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, 364(6433), 138–142. <https://doi.org/10.1038/364138a0>
- [76] Massonnet, D.F., K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface of article. *Reviews of Geophysics* Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, 36(4), 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- [77] MCRNM, M.o.C.o.t.R.o.N.M. (2025). Polog Region. Retrieved, from https://macedonia-timeless.com/eng/cities_and_regions/regions/polog-region/
- [78] Meyer, F. (2019). The SAR handbook.pdf of chapter. In A.I. Flores-Anderson, E.K. Herndon, and B.R. Thapa, Cherrington, Emil (Ed.), *Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques* (pp. 21–43).
- [79] Meyer, F. (2024). GEOS 657 | Microwave Remote Sensing. Retrieved, from <https://radar.community.uaf.edu/>
- [80] Meyer, F. (2024). GEOS F639 901 202401 (CRN 35703) InSar and Its Applications. Retrieved, from <https://canvas.alaska.edu/courses/18500>
- [81] Minh, D.H.T. (Year). InSAR Course of paper. In (Ed.), *Conference InSAR Course* (pp. INRAE).
- [82] MOEPP, (2018) *Национална стратегија за заштити на њиродатиа (2017-2027)*: Скопје.

- [83] Moreira, A., et al. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar of article. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* A tutorial on synthetic aperture radar, 1(1), 6-43. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2013.2248301>
- [84] NASA - National Aeronautics and Space Administration. (2025). NISAR Mission Overview. Retrieved, from <https://science.nasa.gov/mission/nisar/>
- [85] NASA Earthdata. (2025). Synthetic Aperture Radar (SAR). Retrieved, from <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar>
- [86] NGU-Geological Survey of Norway. (2023). What is InSAR? Retrieved, from <https://www.ngu.no/en/geological-mapping/what-insar>
- [87] Oliver, C. and S. Quegan. (2004). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Raleigh, NC: SciTech Publishing.
- [88] Pang, Z.J., Q.; Fan, P.; Jiang, W.; Lv, J.; Zhang, P.; Cui, X.; Zhao, C.; Zhang, Z. (2023). Deformation Monitoring and Analysis of Reservoir Dams Based on SBAS-InSAR Technology – Banqiao Reservoir of article. *Remote Sensing Deformation Monitoring and Analysis of Reservoir Dams Based on SBAS-InSAR Technology – Banqiao Reservoir*, 15(12), <https://doi.org/10.3390/rs15123062>
- [89] Parizzi, A., Brcic, R. (2011). Adaptive InSAR stack multilooking exploiting amplitude statistics: A comparison between different techniques and practical results of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Adaptive InSAR stack multilooking exploiting amplitude statistics: A comparison between different techniques and practical results, 49(8), 3212–3223. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2104325>
- [90] Parizzi, A., Brcic, R., (2011) *Multilooking SAR data based on adaptive estimation of local statistics*, in *FRINGE 2011 Workshop – Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry*, H. Lacoste-Francis, Editor European Space Agency (ESA): Frascati, Italy.
- [91] Pedretti, L.B., Massimiliano; Vivaldi, Valerio; Figini, Silvia; Parnigoni, Matteo; Grossi, Alessandra; Lanteri, Luca; Tararbra, Mauro; Negro, Nicoletta; Meisina, Claudia. (2023). Interpolation of InSAR Time series for the detection of ground deformation events: application to slow-moving landslides of article. *Landslides Interpolation of InSAR Time series for the detection of ground deformation evEnts: application to slow-moving landslides*, 20(9), <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02073-z>
- [92] Pepe, A.L., R. (2006). On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms, 44(9), 2374–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873207>
- [93] Perissin, D. (Year). Interferometric SAR Multi-Temporal Processing of paper. In (Ed.), *Conference Interferometric SAR Multi-Temporal Processing* (pp. IEEE).
- [94] Perissin, D. (2016). Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications of chapter. In (Ed.), *Multitemporal Remote Sensing* (pp. 145-176). Springer.
- [95] Perissin, D. (2018). Geometric Processing: Active Sensor Modeling and Calibration (SAR) of chapter. In S. Liang (Ed.), *omprehensive Remote Sensing, Volume 2: Data Processing and Analysis Methodology* (pp. 61–88). Oxford: Elsevier.
- [96] Perissin, D. (2025). SARPROZ Manual. Retrieved September, from <https://www.sarproz.com/software-manual/>
- [97] Perissin, D., Wang, T. (2012). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets, 50(1), 271–280. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160644>
- [98] Rocca, A. and D. Perissin. (2024). Advanced InSAR course: An intensive live course EO59. Retrieved, from Online live tutorial, not recorded (unpublished)

- [99] Rocca, F. (2004). Synthetic aperture radar: A signal processing perspective of article. *IEEE Signal Processing Magazine* Synthetic aperture radar: A signal processing perspective, 21(1), 26–38. <https://doi.org/10.1109/MSP.2004.1267047>
- [100] Rocca, F.R., A.; Ferretti, A.; Bohane, A. (2013). Advanced InSAR interferometry for reservoir monitoring of article. *First Break* Advanced InSAR interferometry for reservoir monitoring, 31(77–83). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.31.5.68075>
- [101] Ruiz-Armenteros, A.M.M.-S., Miguel; Lamas-Fernández, Francisco; et al. (2025). Integrated Monitoring of Dams and Large Ponds: The Role of Satellite Radar Interferometry and the European Ground Motion Service of article. *Applied Geomatics* Integrated Monitoring of Dams and Large Ponds: The Role of Satellite Radar Interferometry and the European Ground Motion Service, 17(379–392). <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00624-8>
- [102] Salepci, N. and C. Thiel. (Year). SAR Basics: Introduction into SAR measurements, data characteristics & challenges of paper. In (Ed.), *Conference SAR Basics: Introduction into SAR measurements, data characteristics & challenges* (pp. Friedrich-Schiller-University Jena, Department of Earth Observation.
- [103] Sandwell, D.T.P., E. J. (1998). Phase gradient approach to stacking interferograms of article. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* Phase gradient approach to stacking interferograms, 103(B11), 27051–27066.
- [104] Simon. (2015). SRTM-1 (1 Arc second) now available with large global coverage. Retrieved, from <https://digital-geography.com/srtm-1-1-arc-second-now-available-large-global-coverage/>
- [105] Skolnik, M.I. (2001). *Introduction to Radar Systems*. New York: McGraw-Hill.
- [106] Skolnik, M.I. (2008). *Radar Handbook*. 3rd. New York: McGraw-Hill.
- [107] Small, D. (2011). Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery, 49(8), 3081–3093. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>
- [108] Strozzi, T.W., U.; Bitelli, G., (2000) *Differential SAR interferometry for land subsidence mapping in Bologna*, in *Proceedings of SISOLS'2000 (Sixth International Symposium on Land Subsidence)*: Ravenna, Italy.
- [109] Svigkas, N.L., C.; Papoutsis, I.; Kontoes, C.; Alatza, S.; Tzampoglou, P.; Tolomei, C.; Spachos, T. (2020). InSAR Campaign Reveals Ongoing Displacement Trends at High Impact Sites of Thessaloniki and Chalkidiki, Greece of article. *Remote Sensing* InSAR Campaign Reveals Ongoing Displacement Trends at High Impact Sites of Thessaloniki and Chalkidiki, Greece, 12(15), <https://doi.org/10.3390/rs12152396>
- [110] Torres, R.S., P.; Geudtner, D.; Bibby, D.; Davidson, M.; Attema, E.; Miranda, N. (2012). GMES Sentinel-1 mission of article. *Remote Sensing of Environment* GMES Sentinel-1 mission, 120(9–24). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- [111] Touzi, R.L., A.; Bruniquel, J.; Vachon, P. W. (1999). Coherence estimation for SAR imagery of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Coherence estimation for SAR imagery, 37(1), 135–149. <https://doi.org/10.1109/36.739146>
- [112] TRE Altamira. (2025). InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar. Retrieved, from <https://site.tre-altamira.com/insar/>
- [113] Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung. (1981). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Vol. I – *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company.
- [114] Usai, S.K., R. (1999). SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features of article. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features, 37(4), 135–149. <https://doi.org/10.1109/36.774730>
- [115] Wang, F.L., Qing; Zhang, Tao; Li, Rui; Yang, Ming. (2025). Surface Deformation Monitoring and Prediction of InSAR Using Sentinel-1: Construction-Induced Urban Ground Deformations of

- article. Remote Sensing Surface Deformation Monitoring and Prediction of InSAR Using Sentinel-1: Construction-Induced Urban Ground Deformations, 17(17), <https://doi.org/10.3390/rs17172972>
- [116] Wiley, C. (1954). Synthetic aperture radars of article. IRE Professional Group on Information Theory Synthetic aperture radars, PGIT-1(2), 19-21.
- [117] Williams, S.a.B., Y. and Pang, P. (1998). Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products of article. Journal of Geophysical Research: Solid Earth Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products, 103(B11), 27051-27067. <https://doi.org/10.1029/98JB02794>
- [118] Woodhouse, I.H. (2006). Introduction to Microwave Remote Sensing. CRC Press.
- [119] Zebker, H.A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes of article. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Decorrelation in interferometric radar echoes, 30(5), 950-959. <https://doi.org/10.1109/36.175330>
- [120] Zebker, H.A.G., R. M. (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations of article. Journal of Geophysical Research: Solid Earth Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, B5), 4993-4999. <https://doi.org/10.1029/JB091iB05p04993>
- [121] Zebker, H.A.R., P. A.; Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps of article. Journal of Geophysical Research: Solid Earth Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, 102(B4), 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- [122] Zhang, M.P., Jiayi; Ma, Peifeng; Lin, Hui. (2025). Identification and Analysis on Surface Deformation in the Urban Area of Nanchang Based on PS-InSAR Method of article. Remote Sensing Identification and Analysis on Surface Deformation in the Urban Area of Nanchang Based on PS-InSAR Method, 17(1), 157. <https://doi.org/10.3390/rs17010157>

7. ПРИЛОЗИ

7.1 ПРИЛОГ 1 (PYTHON АЛАТКА ЗА СИМНУВАЊЕ НА *SENTINEL-1 SLC* СНИМКИ СПОРЕД *IW* ПОЈАС И ПОЛАРИЗАЦИЈА)

Python алатката е изработена со цел автоматизирано симнување на *Sentinel-1 SLC* снимки од платформата *Alaska Satellite Facility (ASF) Vertex*, при што корисникот може интерактивно да избере посакуван *IW* појас (*IW1*, *IW2*, *IW3*) или комбинација од нив. Скриптата е специјално дизајнирана да презема само снимки со *VV* поларизација, со што значително се намалува обемот на податоци и се оптимизира времето на симнување.

Како влезен параметар, алатката користи *.metalink* датотека генерирана преку *ASF Vertex* порталот, кој содржи листа на претходно селектирани *Sentinel-1 SLC* снимки. Врз основа на оваа датотека, скриптата автоматски ги презема само релевантните поддиректориуми од *.SAFE* структурата (*measurement*, *annotation*, *calibration*, *noise*) што одговараат на избраниот *IW* појас и *VV* поларизација.

Како излез, се добиваат целосно структурирани *SLC* снимки подготвени за директно повикување во софтверот *SARPROZ*, што овозможува нивна понатамошна обработка и примена во *InSAR* анализи.

На следната слика е прикажан интерфејсот што корисникот ги добива при повикување на скриптата.

```
(base) C:\Users\user\Desktop\SARPROZ_analyses\Poloshka_kotlina\Project_DSC>python smart_download.py
Enter your Earthdata username: tomegegovski2
Enter your Earthdata password:

Select swath(s) to download, separated by commas (e.g. 1,3 for IW1 and IW3):
1. IW1
2. IW2
3. IW3
Enter number(s): 1
↓ S1A_IW_SLC__1SDV_20250620T044726_20250620T044753_059725_076AA2_F0DB.zip (1/505)
🕒 Time for S1A_IW_SLC__1SDV_20250620T044726_20250620T044753_059725_076AA2_F0DB.zip: 156.1 seconds
↓ S1C_IW_SLC__1SDV_20250614T044614_20250614T044642_002774_005B4C_1E6A.zip (2/505)
🕒 Time for S1C_IW_SLC__1SDV_20250614T044614_20250614T044642_002774_005B4C_1E6A.zip: 155.8 seconds
↓ S1A_IW_SLC__1SDV_20250608T044726_20250608T044753_059550_07649C_11E4.zip (3/505)
🕒 Time for S1A_IW_SLC__1SDV_20250608T044726_20250608T044753_059550_07649C_11E4.zip: 153.4 seconds
↓ S1C_IW_SLC__1SDV_20250602T044613_20250602T044641_002599_00563D_7D65.zip (4/505)
🕒 Time for S1C_IW_SLC__1SDV_20250602T044613_20250602T044641_002599_00563D_7D65.zip: 157.8 seconds
↓ S1A_IW_SLC__1SDV_20250527T044727_20250527T044754_059375_075E9E_B0DE.zip (5/505)
🕒 Time for S1A_IW_SLC__1SDV_20250527T044727_20250527T044754_059375_075E9E_B0DE.zip: 152.9 seconds
↓ S1C_IW_SLC__1SDV_20250521T044612_20250521T044639_002424_005143_86C7.zip (6/505)
🕒 Time for S1C_IW_SLC__1SDV_20250521T044612_20250521T044639_002424_005143_86C7.zip: 155.7 seconds
↓ S1A_IW_SLC__1SDV_20250515T044728_20250515T044755_059200_075885_62BC.zip (7/505)
|
```

Во продолжение се приложени две слики од *python* кодот на оваа алатка за симнување.

```

1  import argparse
2  import os
3  import xml.etree.ElementTree as ET
4  from remotezip import RemoteZip
5  import time
6  import requests
7  from requests.auth import HTTPBasicAuth
8
9  def find_metalink_file():
10     for file in os.listdir():
11         if file.endswith('.metalink'):
12             return file
13     return None
14
15 def download_sla_subset(metalink_path, output_dir, swaths, username, password):
16     ns = {'ml': 'http://www.metalinker.org/'}
17     tree = ET.parse(metalink_path)
18     root = tree.getroot()
19     files = root.findall('./ml:file', ns)
20
21     os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)
22     total = len(files)
23
24     session = requests.Session()
25     session.auth = HTTPBasicAuth(username, password)
26
27     for idx, f in enumerate(files, 1):
28         name = f.get('name')
29         url = f.find('./ml:url', ns).text
30         scene_folder = os.path.join(output_dir, name.replace(".zip", ".SAFE"))
31         os.makedirs(scene_folder, exist_ok=True)
32
33         print(f"! {name}  ({{idx}}/{{total}})")
34         start_time = time.time()
35
36         try:
37             with RemoteZip(url, session=session) as z:
38                 for zinfo in z.infolist():
39                     zname = zinfo.filename.lower()
40                     is_measurement = '/measurement/' in zname
41                     is_correct_burst = any(sw in zname for sw in swaths) and 'vv' in
zname and zname.endswith('.tiff')
42
43                     if is_measurement and not is_correct_burst:
44                         continue
45                     if zinfo.filename.endswith('/'):
46                         continue
47
48                     local_path = os.path.join(scene_folder, os.path.relpath(zinfo.
filename, name.replace(".zip", ".SAFE")))
49                     os.makedirs(os.path.dirname(local_path), exist_ok=True)
50
51                     with z.open(zinfo.filename) as remote_file, open(local_path, 'wb') as
local_file:
52                         local_file.write(remote_file.read())
53
54         except Exception as e:
55             print(f"! Error with {name}: {e}")
56
57         elapsed = time.time() - start_time
58         print(f"@ Time for {name}: {elapsed:.1f} seconds\n")
59
60 if __name__ == "__main__":
61     metalink = find_metalink_file()
62     if not metalink:
63         print("X No .metalink file found in the current directory.")

```

```
64         exit(1)
65
66     username = input("Enter your Earthdata username: ").strip()
67     import getpass
68     password = getpass.getpass("Enter your Earthdata password: ").strip()
69
70     print("\nSelect swath(s) to download, separated by commas (e.g. 1,3 for IW1 and
71     IW3):")
72     print(" 1. IW1\n 2. IW2\n 3. IW3")
73     choice = input("Enter number(s): ").strip()
74     selected = [s.strip() for s in choice.split(',') if s.strip() in {'1','2','3'}]
75
76     if not selected:
77         print("X No valid swath selected. Exiting.")
78         exit(1)
79
80     swath_map = {'1': 'iw1', '2': 'iw2', '3': 'iw3'}
81     swaths = [swath_map[s] for s in selected]
82
83     download_sla_subset(metalink, 'SLC', swaths, username, password)
```

7.2 ПРИЛОГ 2 (ПОЛОЖБЕНИ КООРДИНАТИ И БРЗИНИ НА ПОЛОЖБЕНИ ПОМЕСТУВАЊА НА МЕРНИТЕ ТОЧКИ НА БРАНА ЛИСИЧЕ)

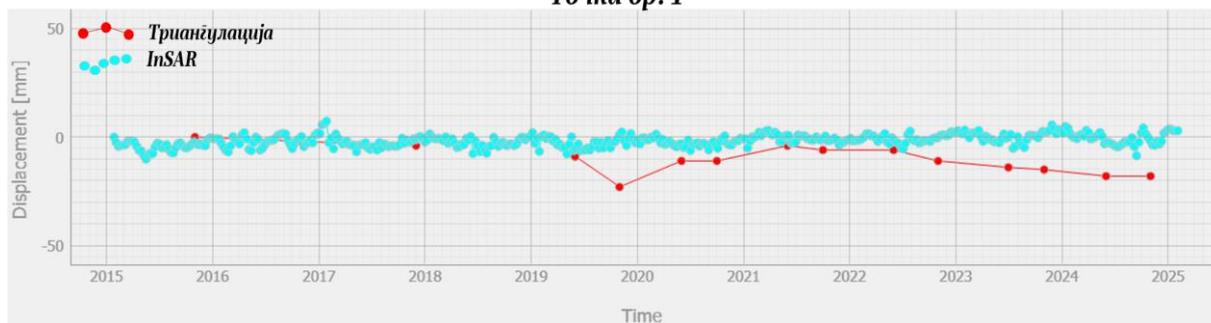
Број на точка	Y	X	Поместување по X - оска	Брзина на поместување (v)	σ_v
	Y[m]	[m]	[mm]	[mm/год]	[mm/год]
1	1733.797	4999.973	-18	-1.5	± 0.5
2	1676.968	4999.989	-16	-1.0	± 0.5
3	1626.957	4999.998	-15	-0.3	± 0.9
4	1576.900	5000.019	-2	0.4	± 0.8
5	1526.985	5000.046	22	2.7	± 0.8
7	1427.269	5000.085	49	5.9	± 0.8
8	1377.185	5000.093	54	6.3	± 1.0
9	1327.437	5000.027	23	3.1	± 0.6
10	1277.134	5000.018	-12	-0.7	± 0.5
11	1227.158	4999.948	-20	-2.0	± 0.7
12	1179.242	4999.958	-14	-1.3	± 0.5
20	1677.106	5032.717	-15	-1.1	± 0.4
21	1627.188	5031.887	-3	-0.1	± 0.5
22	1577.094	5031.365	8	1.4	± 0.4
23	1527.261	5030.415	32	3.5	± 0.7
24	1477.323	5029.912	58	6.5	± 1.0
25	1427.076	5030.017	76	8.7	± 0.9
26	1377.493	5030.698	74	8.3	± 0.9
27	1327.002	5031.526	42	5.0	± 0.6
28	1276.877	5032.479	6	0.8	± 0.5
29	1227.559	5033.688	-9	-1.1	± 0.9
30	1627.189	5064.409	-5	-0.3	± 0.4
31	1578.343	5064.066	6	-0.3	± 0.6
32	1527.239	5063.457	16	1.7	± 0.5
33	1477.451	5063.160	45	4.9	± 0.8
34	1427.306	5063.092	70	7.5	± 0.9
35	1377.262	5063.593	66	6.9	± 0.9
36	1326.759	5063.865	31	3.6	± 0.7
37	1277.218	5064.471	-13	-1.4	± 0.6
40	1627.208	5098.551	-15	-1.6	± 0.5
41	1577.243	5097.523	-4	-0.3	± 0.5
42	1527.033	5097.043	13	1.5	± 0.4
43	1477.193	5096.366	35	3.3	± 0.7
44	1427.422	5096.828	49	5.5	± 1.0
45	1377.205	5097.070	32	3.8	± 0.7
46	1327.019	5097.754	-2	0.4	± 0.4
50	1577.204	5130.910	-10	-1.0	± 0.3
51	1527.966	5130.389	5	1.0	± 0.4
52	1477.523	5130.514	23	2.2	± 0.7
53	1426.602	5130.503	25	3.2	± 0.8
54	1378.469	5130.660	-0.2	-0.2	± 0.3
60	1527.279	5164.801	-3	-0.5	± 0.4
62	1427.177	5165.188	13	0.7	± 0.6

7.3 ПРИЛОГ 3 (Надморски висини и брзини на вертикални поместувања на мерните точки на брана Лисиче)

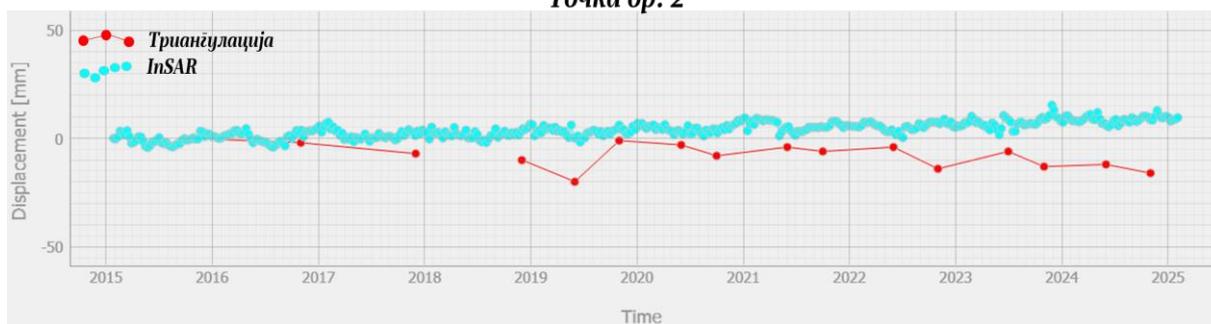
Бр. на точка	Над. висина (H)	Брзина на њом. (v)	σ_v
	[m]	[mm/гог]	[mm/гог]
1	427.5889	0.8	± 0.3
2	427.6584	-2.0	± 0.5
3	427.8429	-2.7	± 0.6
4	427.9853	-4.9	± 0.6
5	428.1580	-7.4	± 0.9
7	428.3912	-11.4	± 1.2
8	428.3750	-10.2	± 0.9
9	428.1496	-8.4	± 0.9
10	427.9218	-3.7	± 0.5
11	427.7522	-0.2	± 0.3
12	427.4576	0.3	± 0.3
20	415.5177	0.5	± 0.3
21	415.8947	-1.0	± 0.4
22	416.2830	-1.8	± 0.4
23	416.7803	-4.9	± 0.8
24	417.2016	-7.2	± 0.9
25	417.1521	-9.5	± 1.0
26	416.6579	-9.1	± 0.7
27	416.2222	-5.7	± 0.6
28	415.9655	-0.8	± 0.4
29	415.4818	0.9	± 0.3
30	404.6922	-0.2	± 0.4
31	405.1557	-1.6	± 0.5
32	405.5884	-3.7	± 0.8
33	405.8038	-6.5	± 0.9
34	406.0528	-11.5	± 1.2
35	405.6639	-12.4	± 1.1
36	405.2214	-8.4	± 1.2
37	405.0194	-0.9	± 0.4
40	393.8830	1.2	± 0.3
41	394.2356	0.6	± 0.3
42	394.6398	-0.7	± 0.4
43	394.7378	-3.6	± 0.8
44	394.8083	-9.7	± 0.8
45	394.5631	-11.0	± 1.3
46	394.2423	0.2	± 0.3
47	393.9495	0.5	± 0.3
50	382.8326	1.9	± 0.3
51	383.1068	1.2	± 0.3
52	383.0304	-1.3	± 0.5
53	383.0741	-5.0	± 1.1
54	383.3152	-0.4	± 0.4
60	371.8207	1.2	± 0.3
62	371.7011	0.4	± 0.4

7.4 ПРИЛОГ 4 (СПОРЕДБИ НА ВРЕМЕНСКИ СЕРИИ НА ХОРИЗОНТАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА ОПРЕДЕЛЕНИ СО *InSAR* И ГЕОДЕТСКИ МЕРЕЊА)

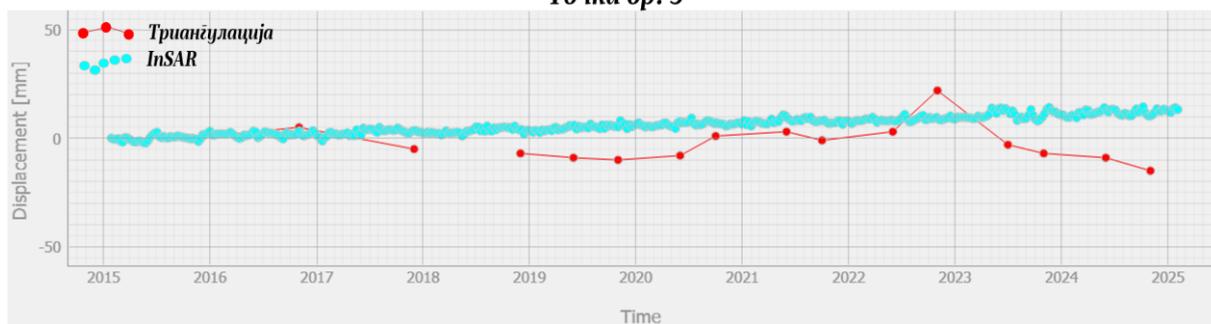
Точка бр. 1



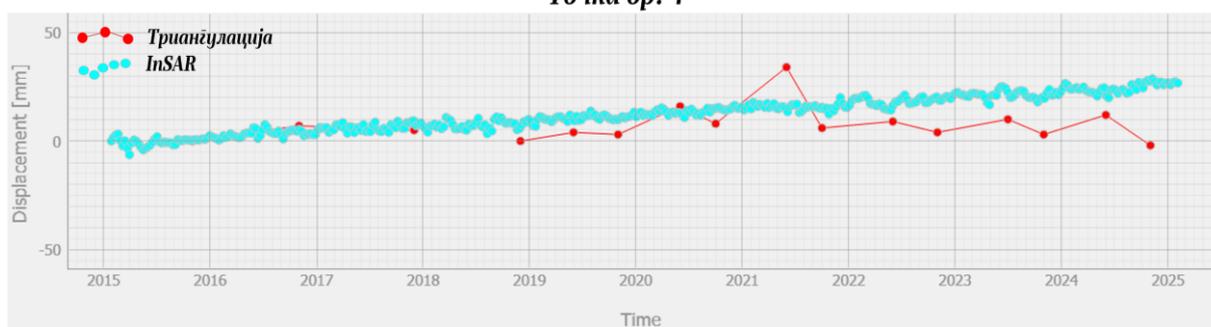
Точка бр. 2



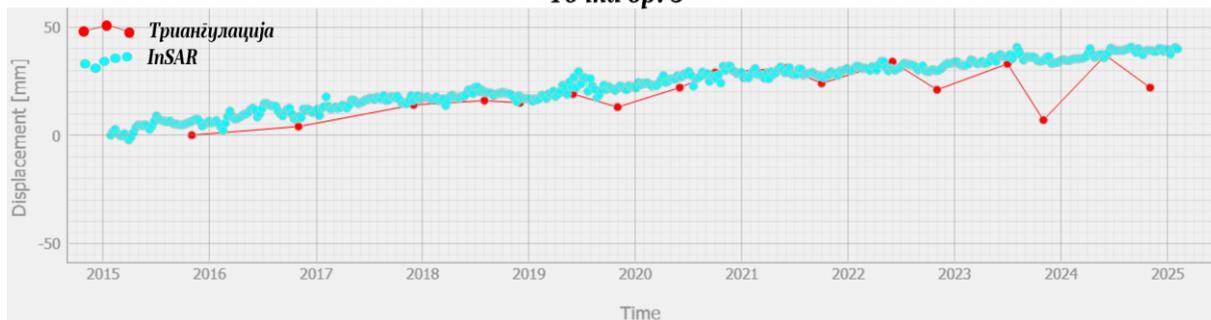
Точка бр. 3



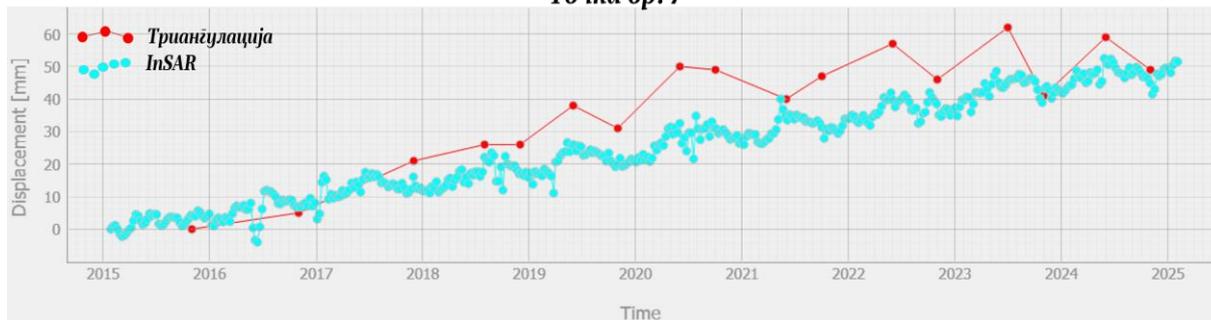
Точка бр. 4



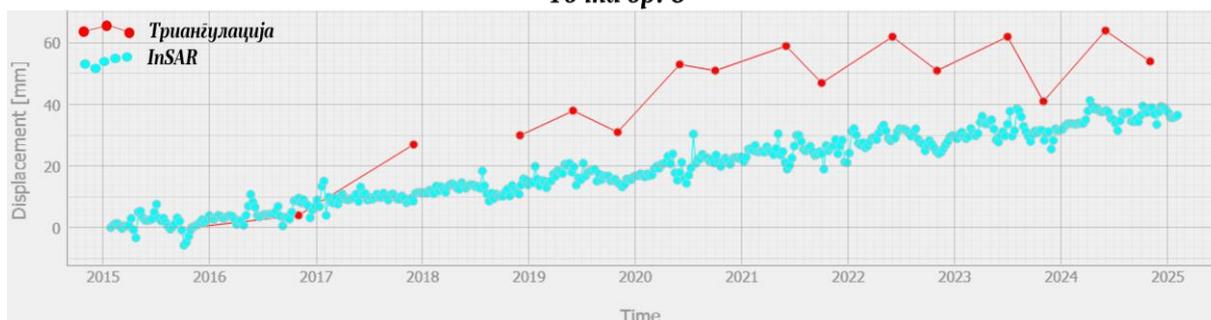
Точка бр. 5



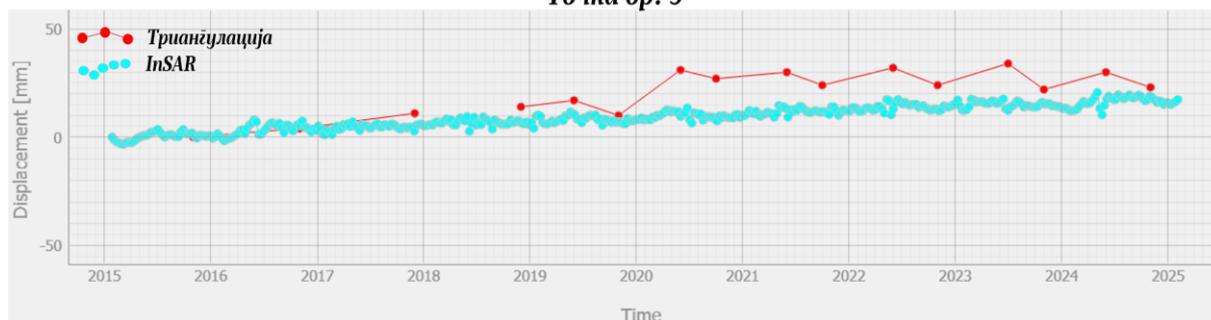
Точка бр. 7



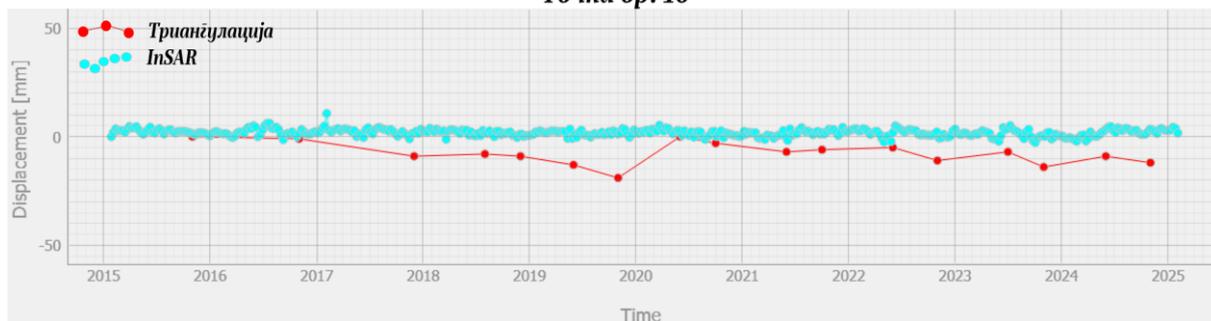
Точка бр. 8



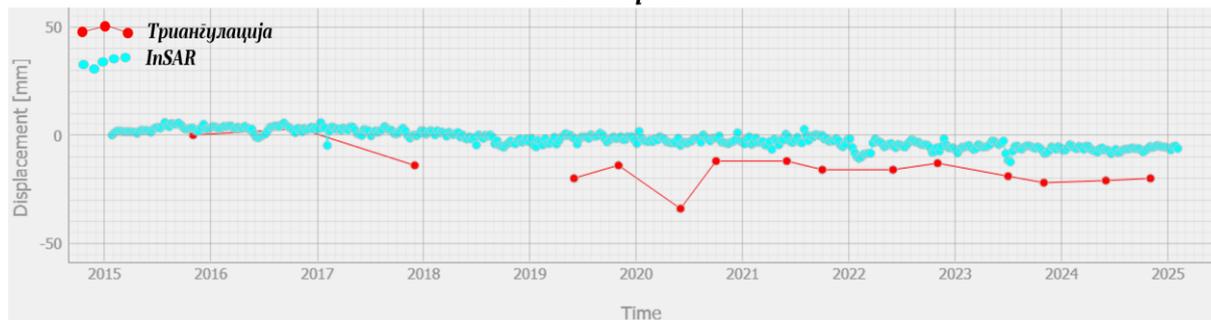
Точка бр. 9



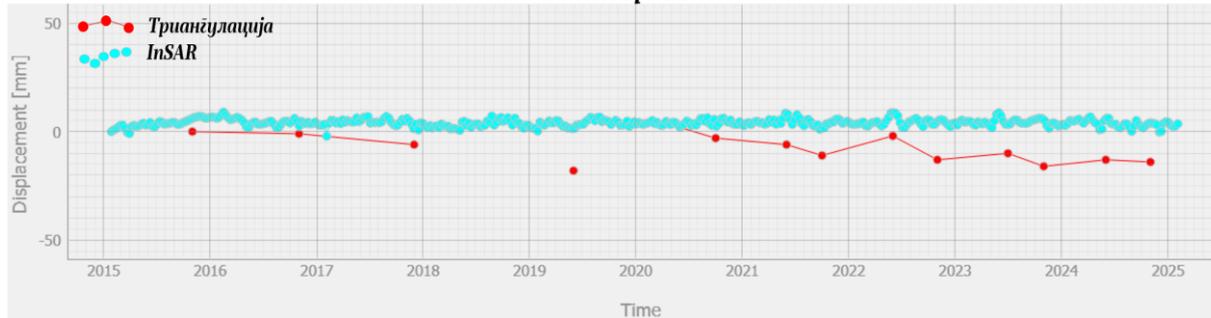
Точка бр. 10



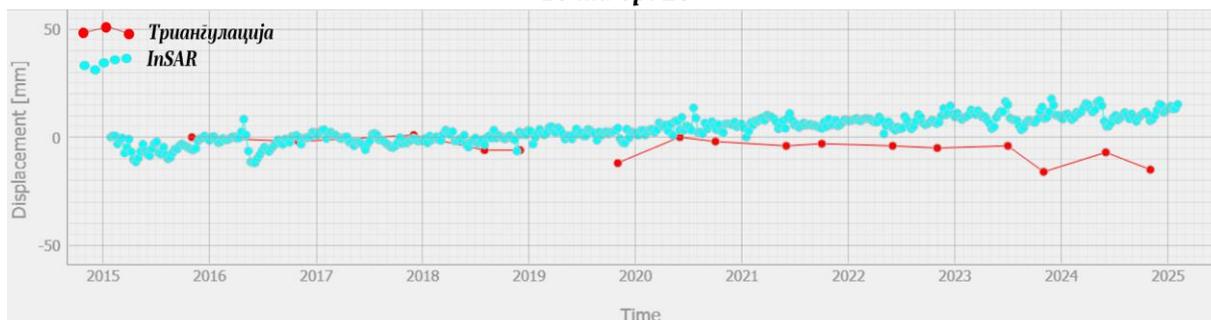
Точка бр. 11



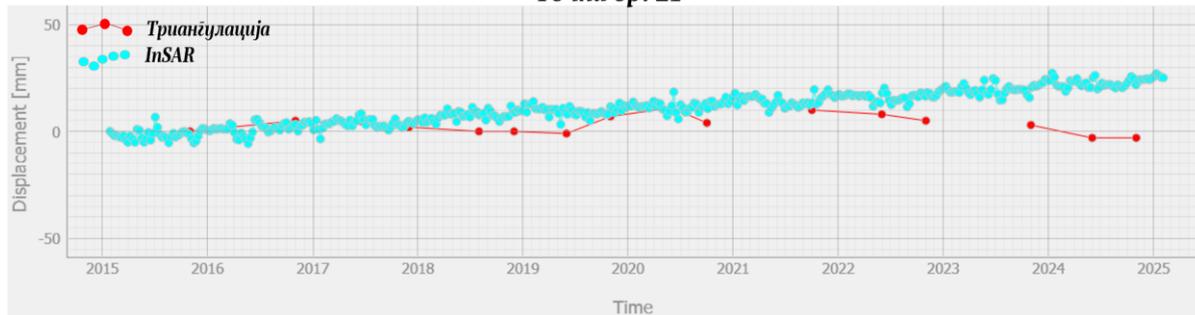
Точка бр. 12



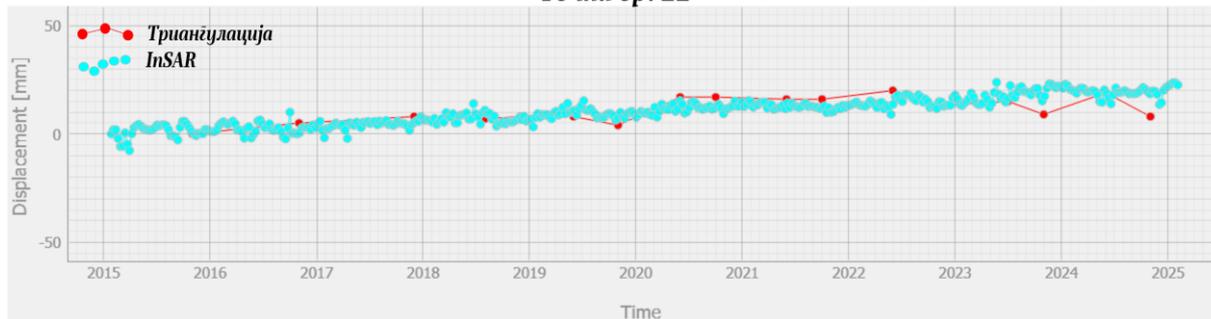
Точка бр. 20



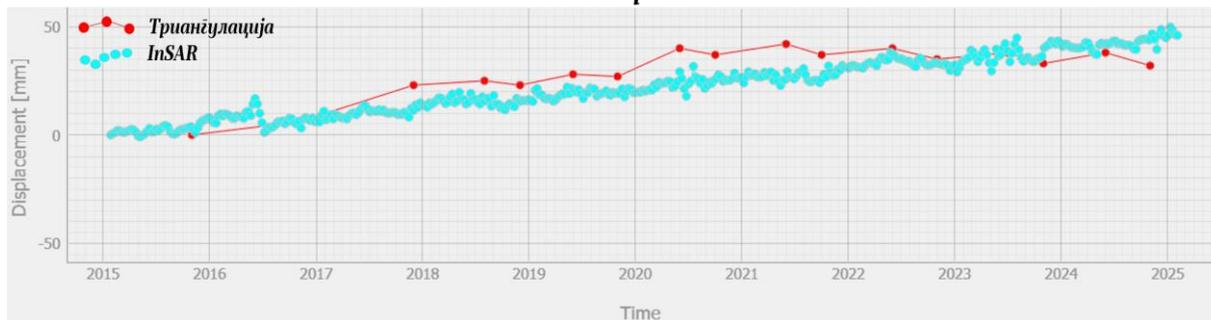
Точка бр. 21



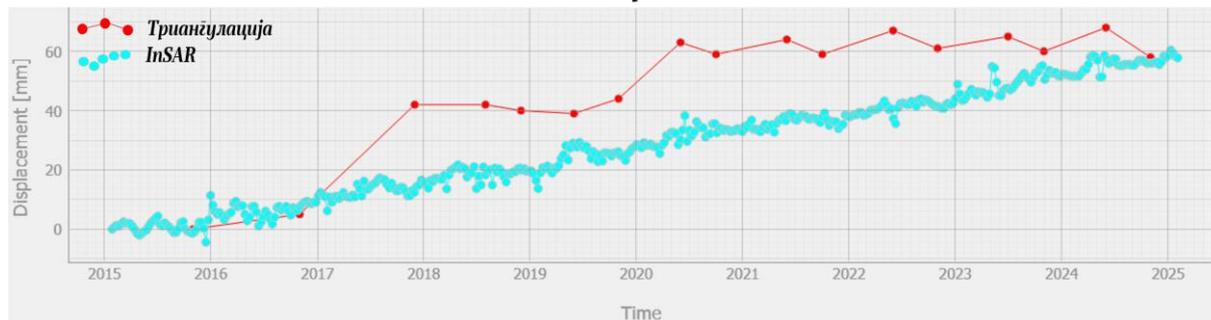
Точка бр. 22



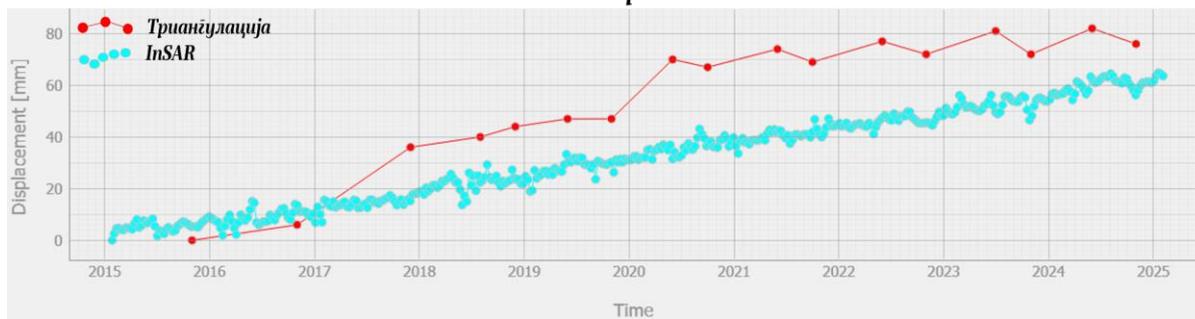
Точка бр. 23



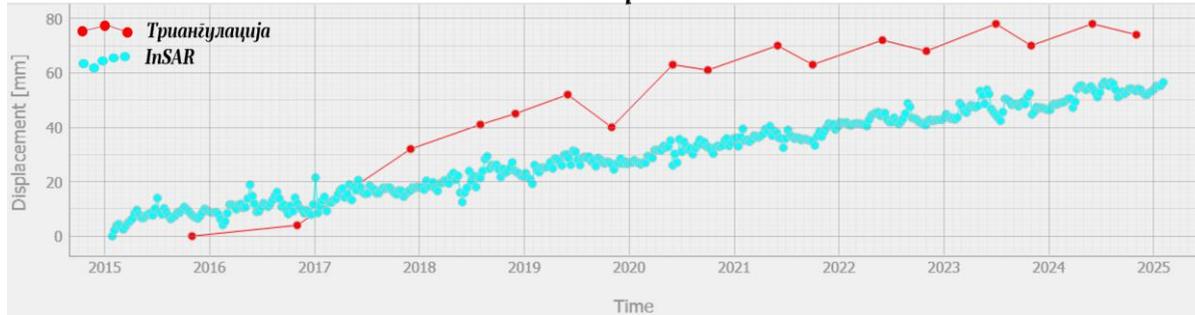
Точка бр. 24



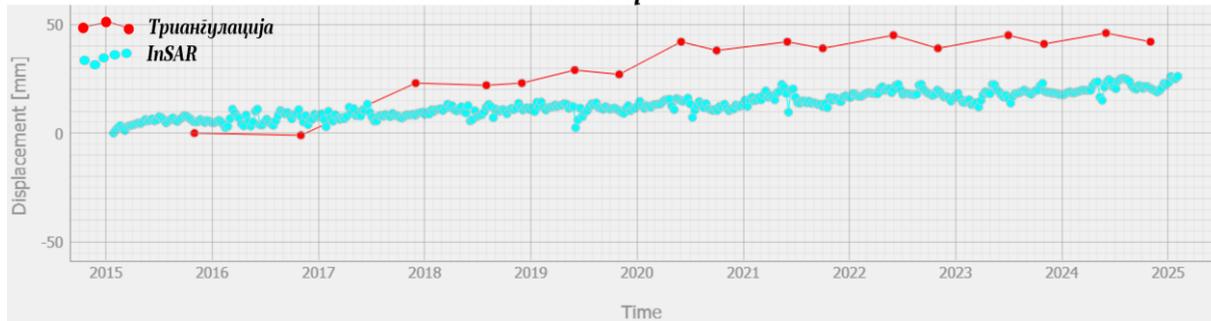
Точка бр. 25



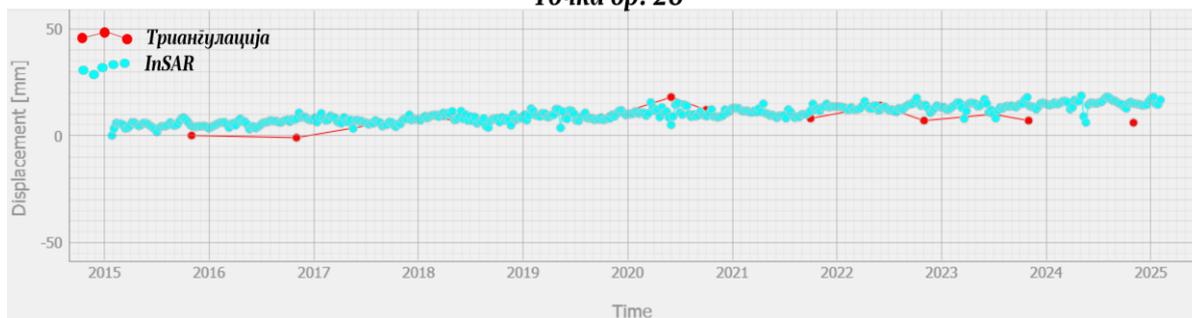
Точка бр. 26



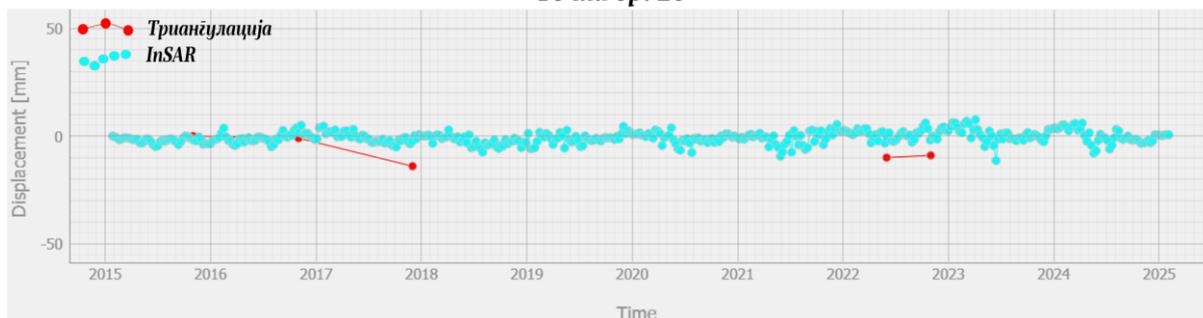
Точка бр. 27



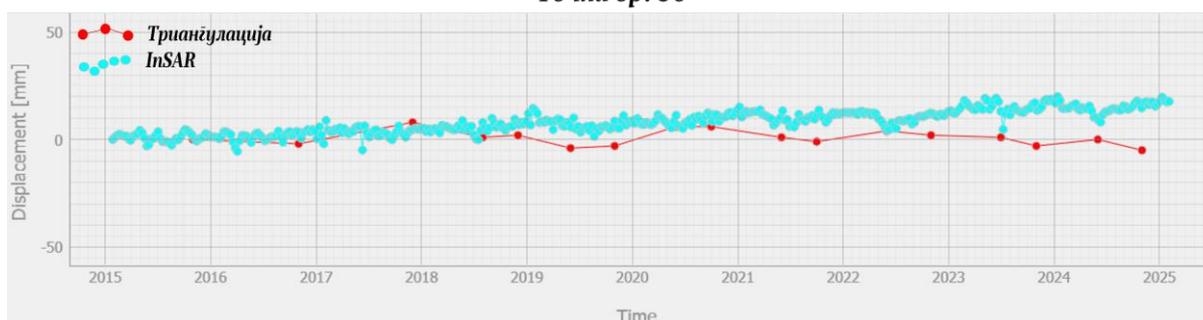
Точка бр. 28



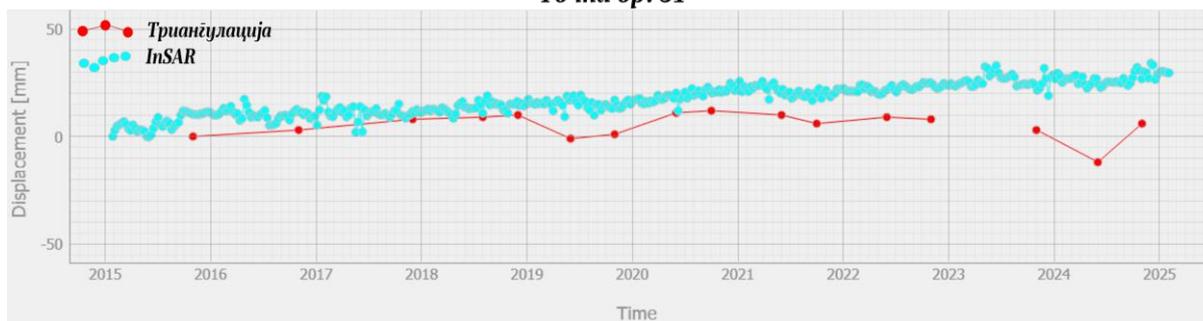
Точка бр. 29



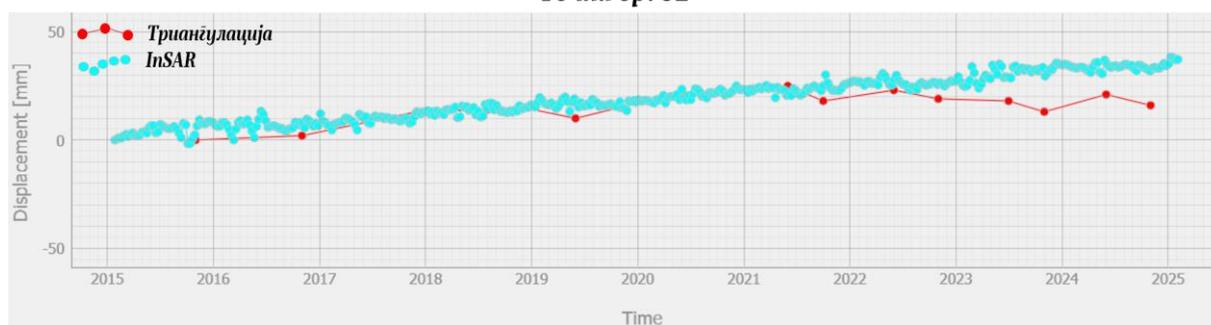
Точка бр. 30



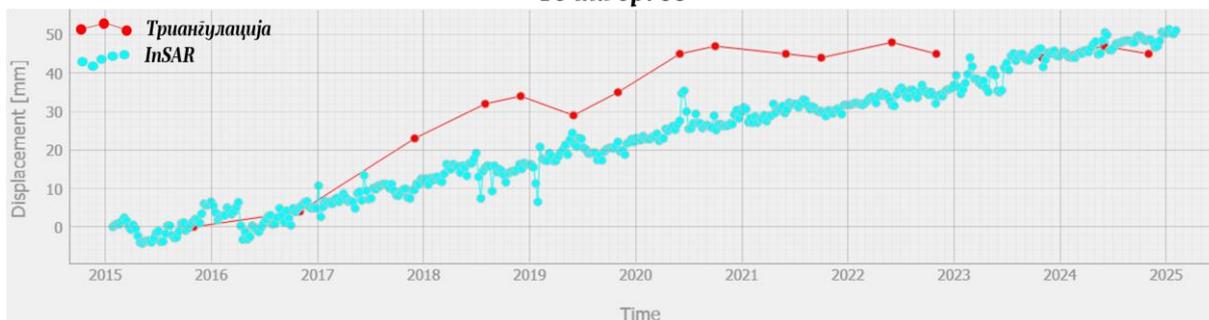
Точка бр. 31



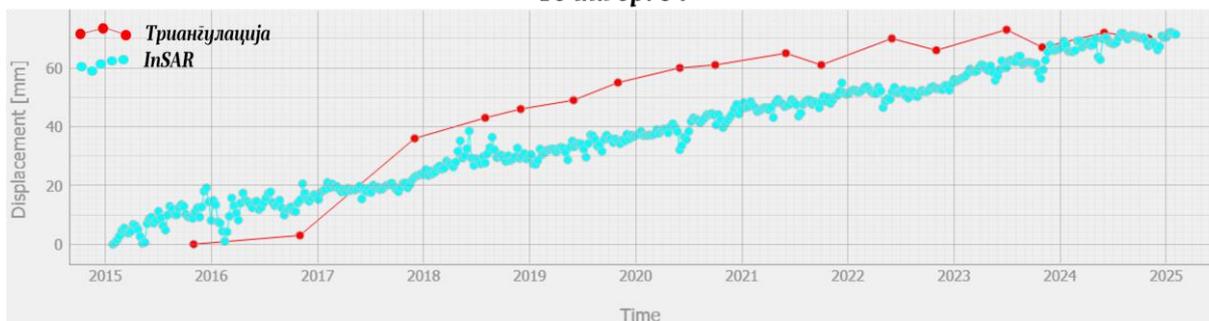
Точка бр. 32



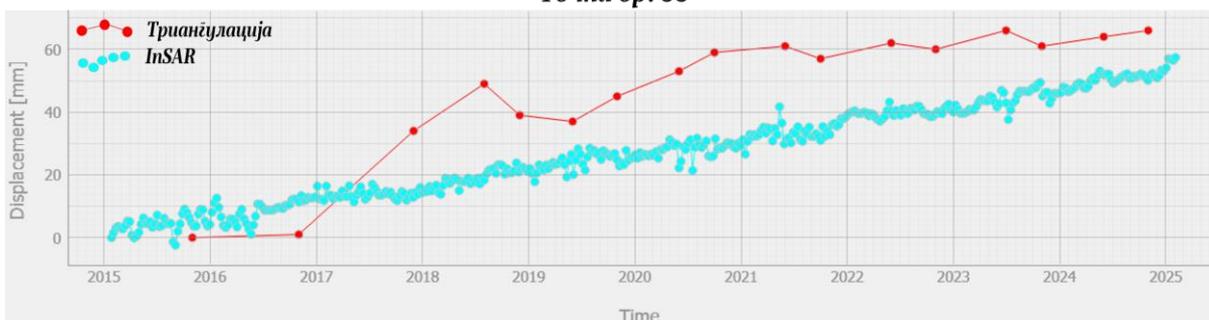
Точка бр. 33



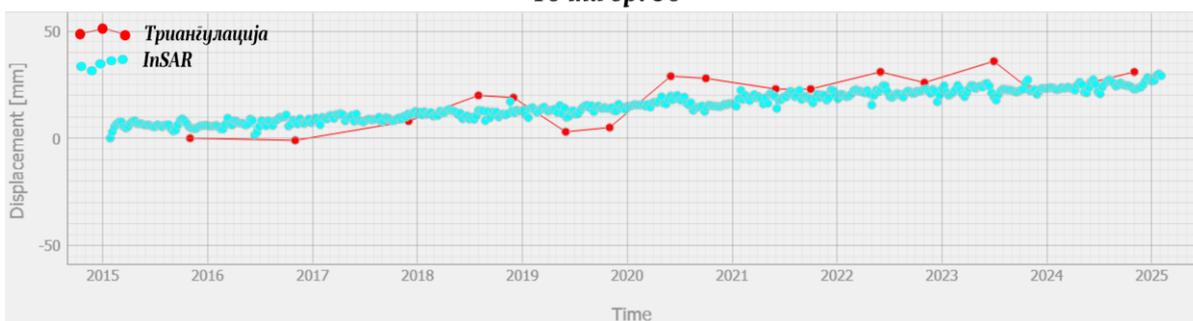
Точка бр. 34



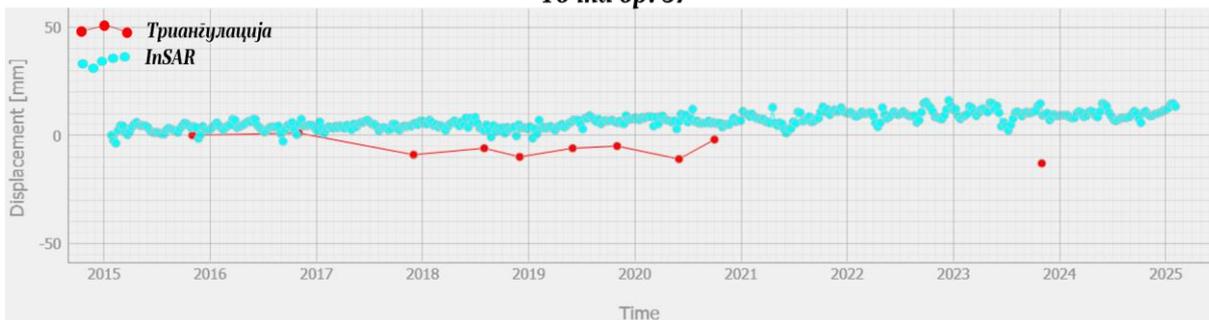
Точка бр. 35



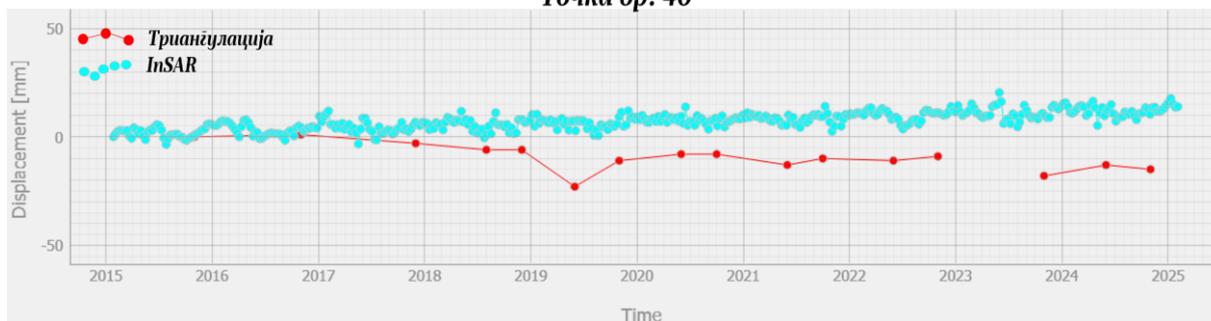
Точка бр. 36



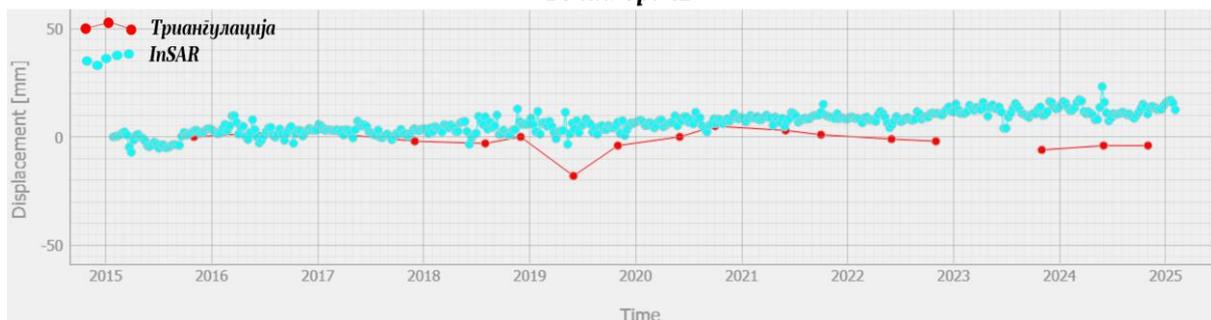
Точка бр. 37



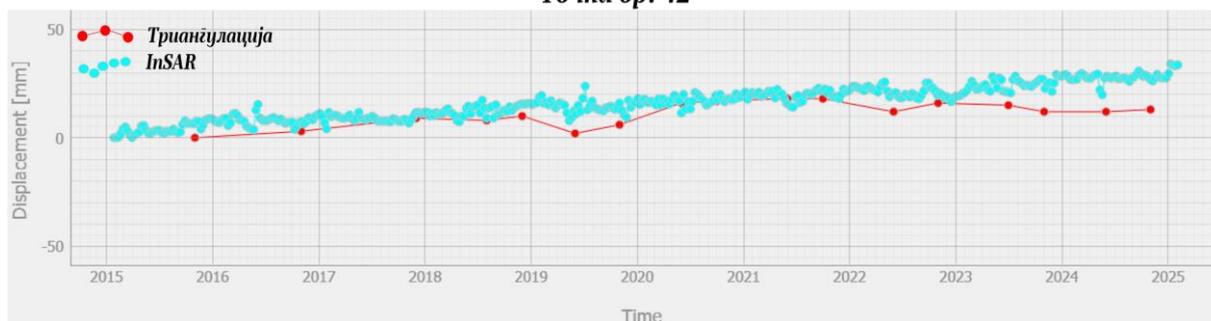
Точка бр. 40



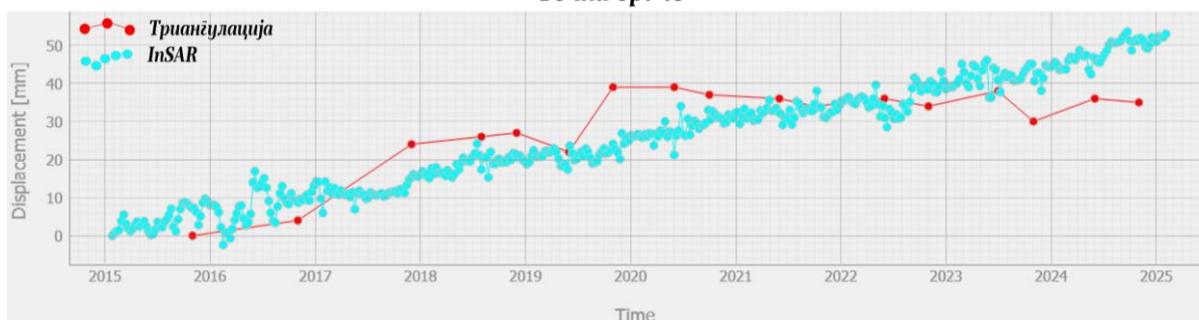
Точка бр. 41



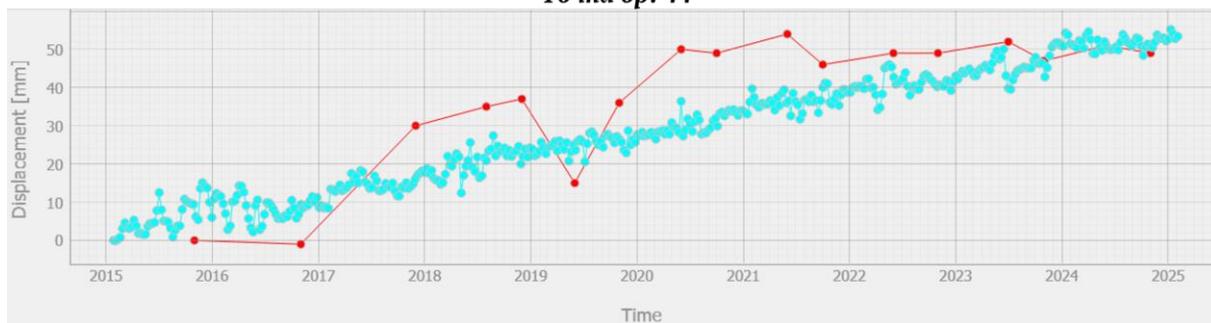
Точка бр. 42



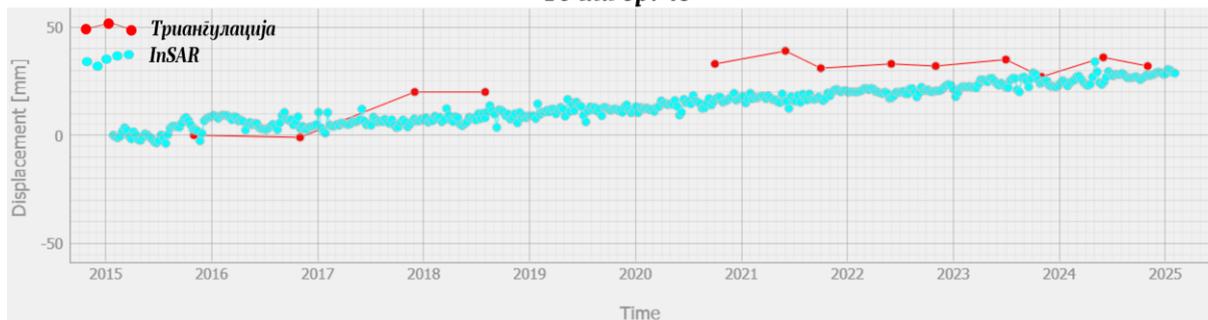
Точка бр. 43



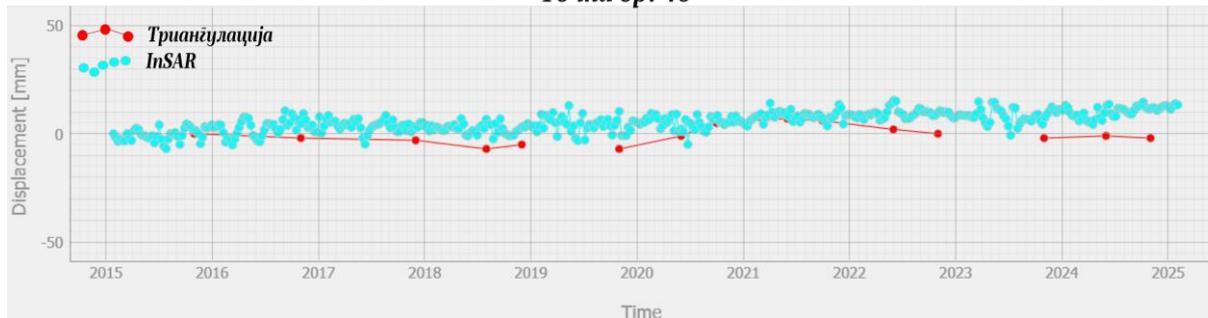
Точка бр. 44



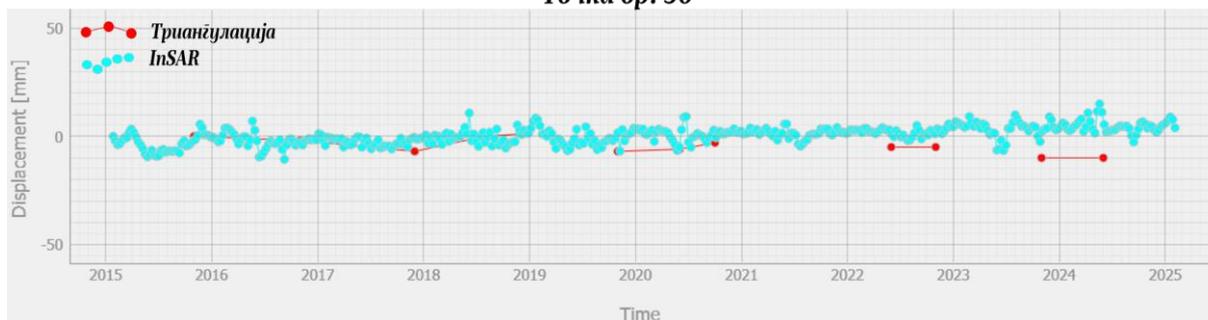
Точка бр. 45



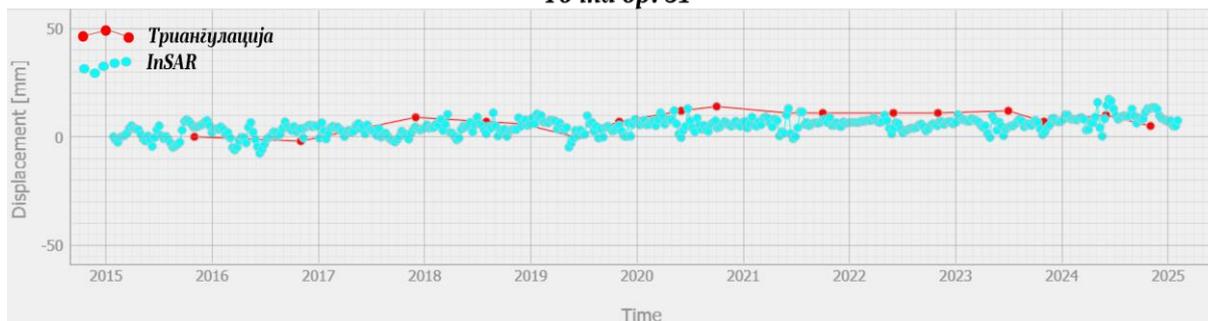
Точка бр. 46



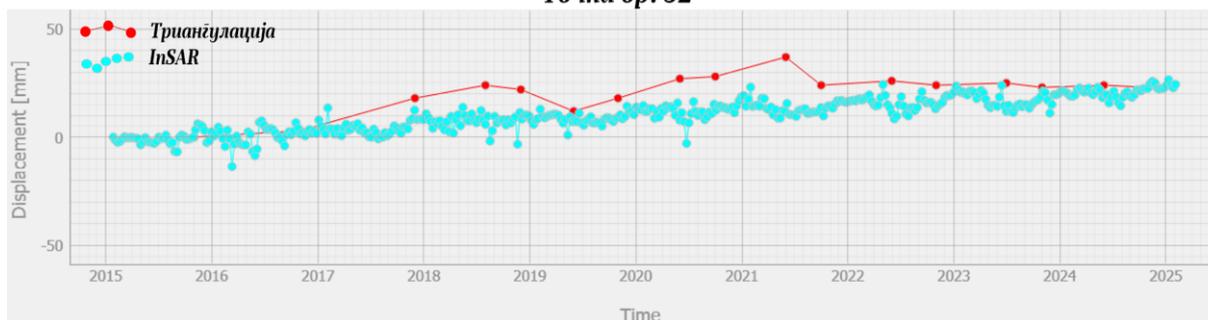
Точка бр. 50



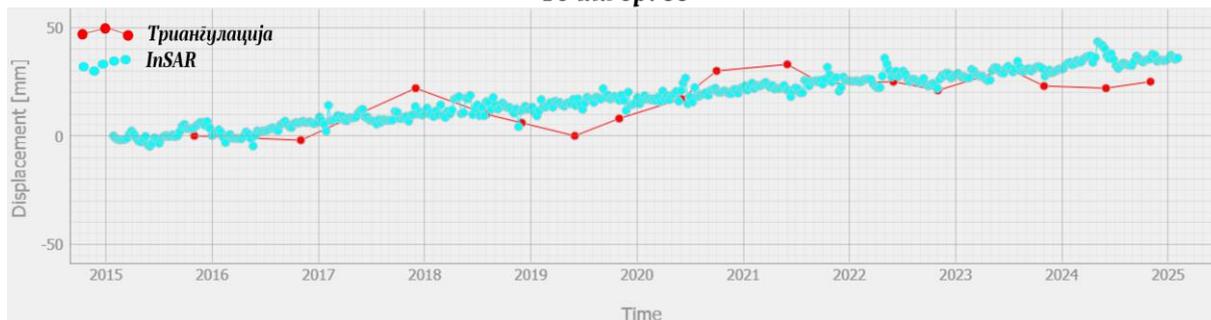
Точка бр. 51



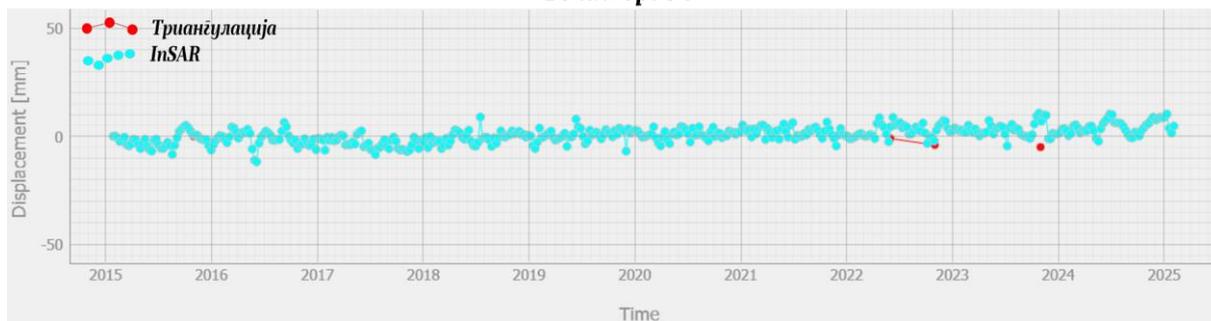
Точка бр. 52



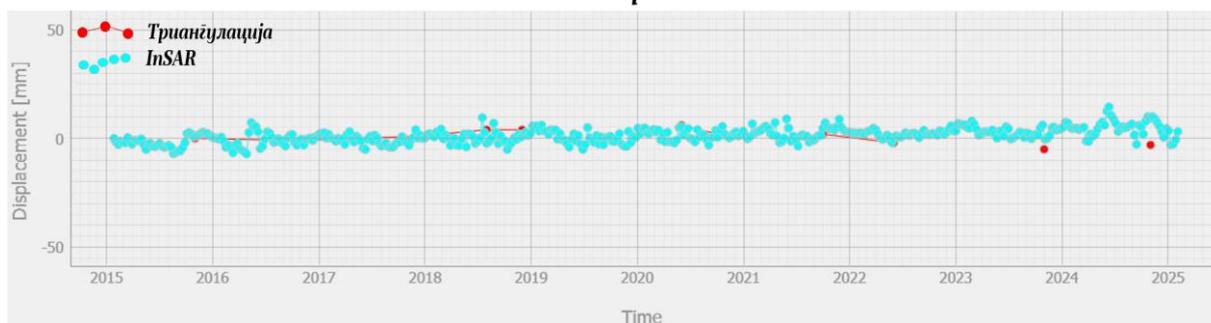
Точка бр. 53



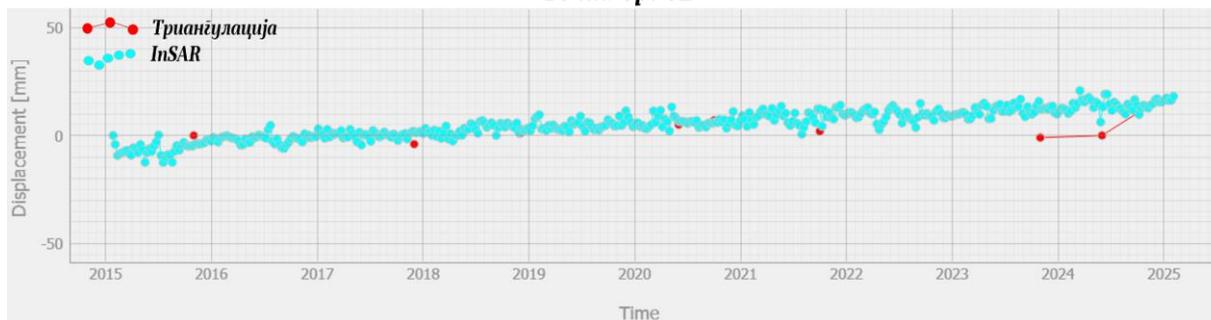
Точка бр. 54



Точка бр. 60

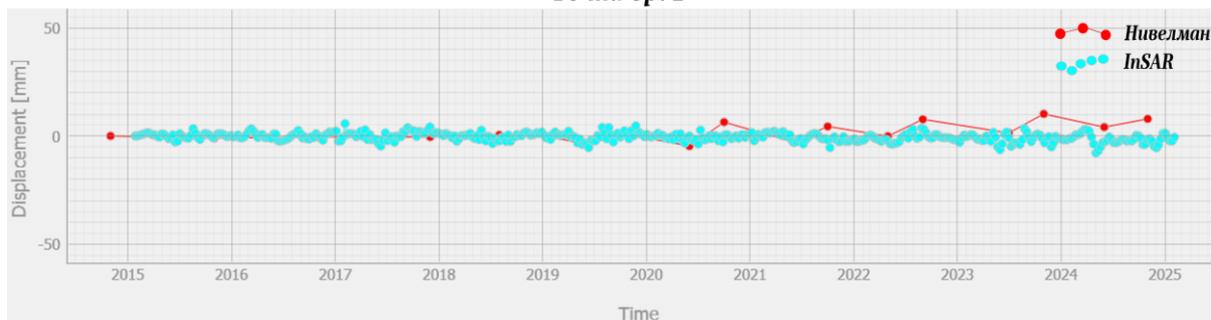


Точка бр. 62

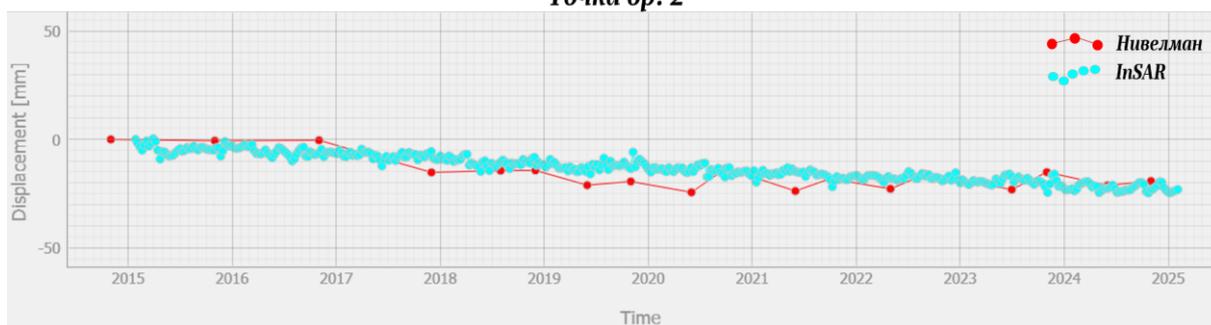


7.5 ПРИЛОГ 5 (СПОРЕДБИ НА ВРЕМЕНСКИ СЕРИИ НА ВЕРТИКАЛНИТЕ ПОМЕСТУВАЊА ОПРЕДЕЛЕНИ СО *InSAR* И ПРЕЦИЗЕН НИВЕЛМАН)

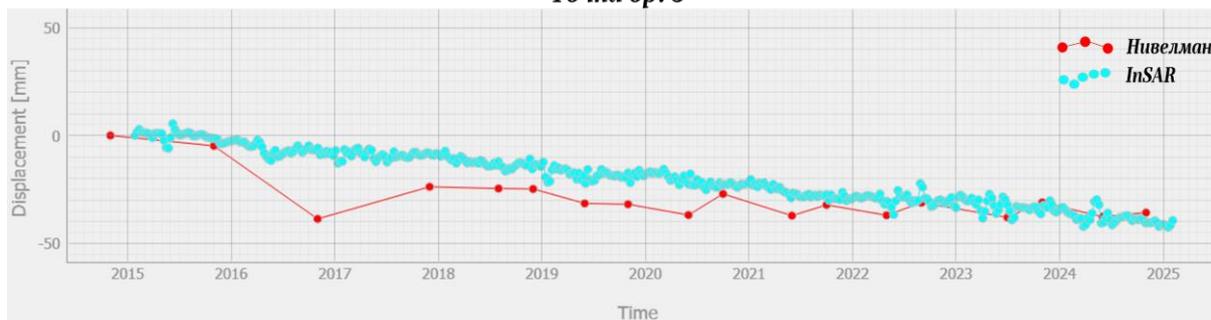
Точка бр. 1



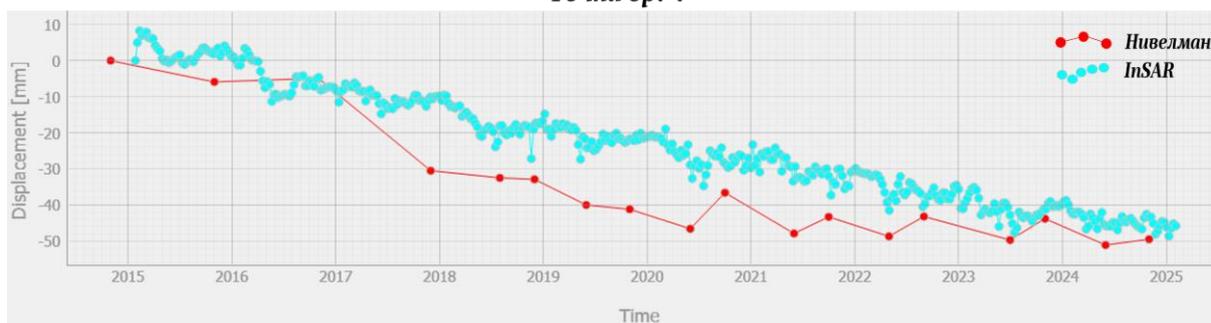
Точка бр. 2



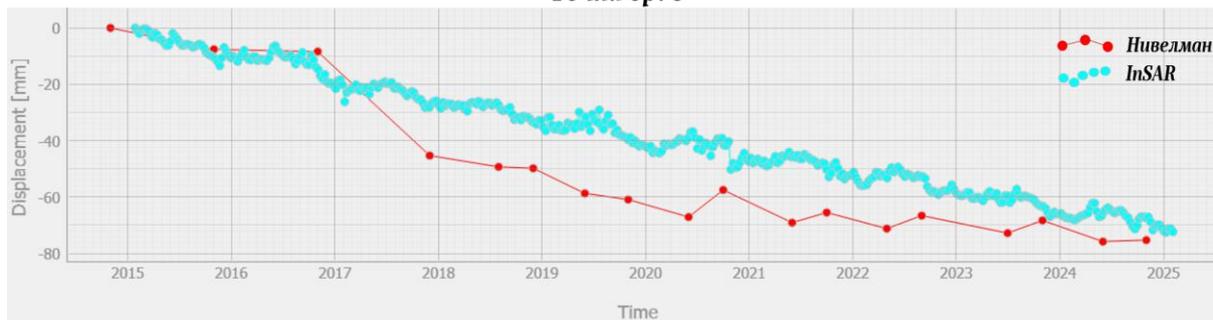
Точка бр. 3



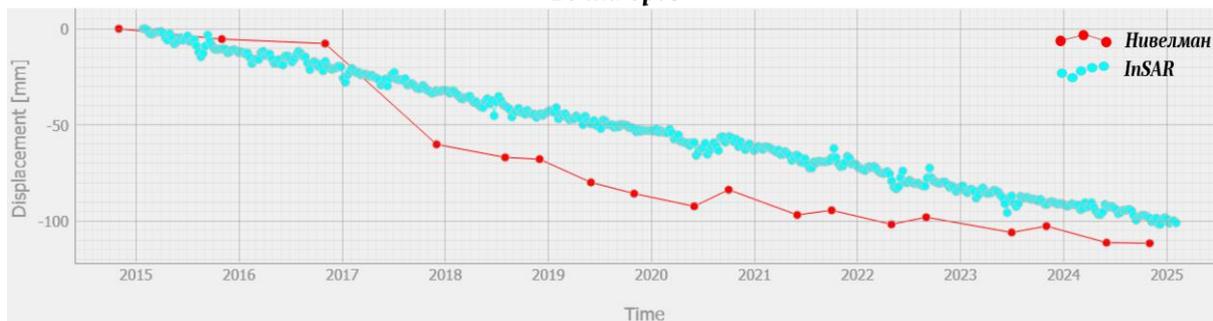
Точка бр. 4



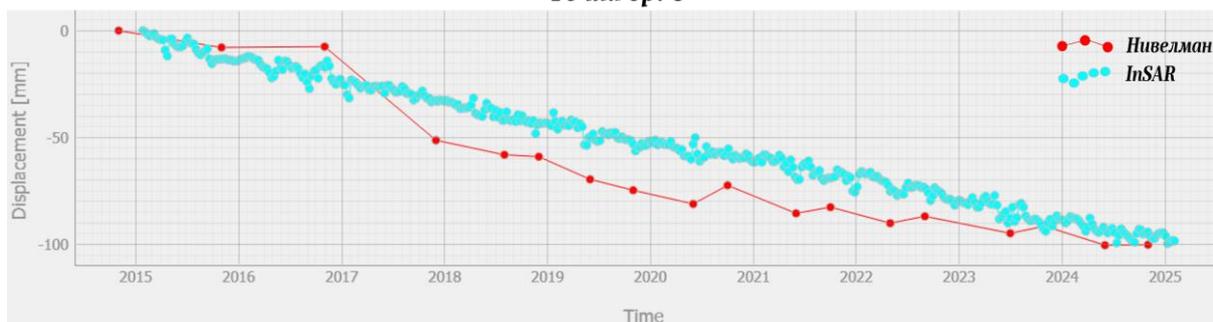
Точка бр. 5



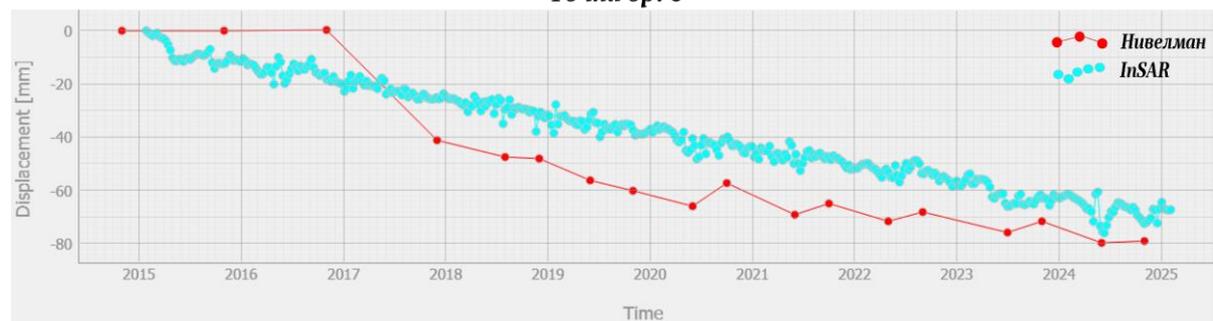
Точка бр. 7



Точка бр. 8



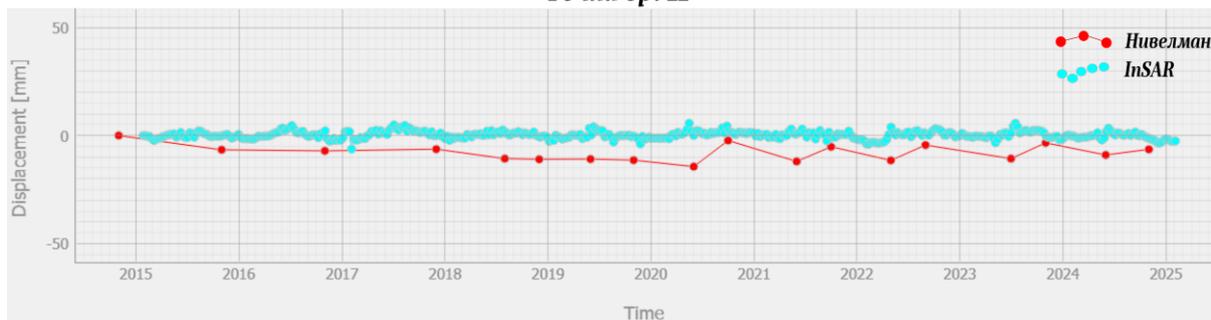
Точка бр. 9



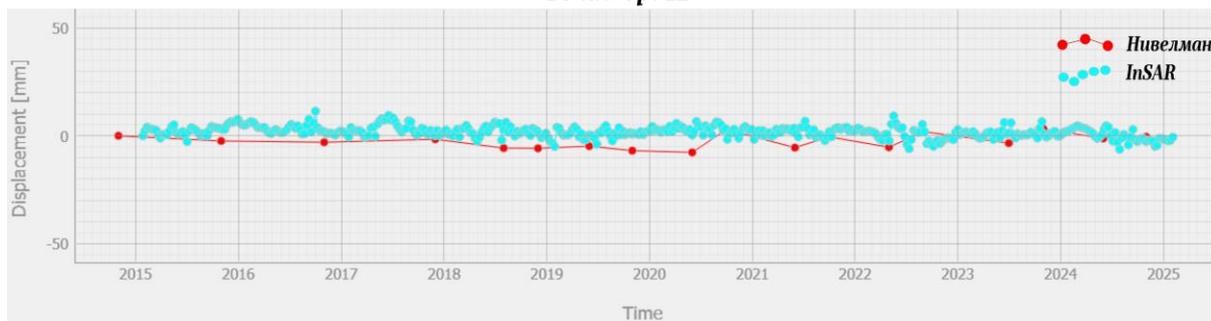
Точка бр. 10



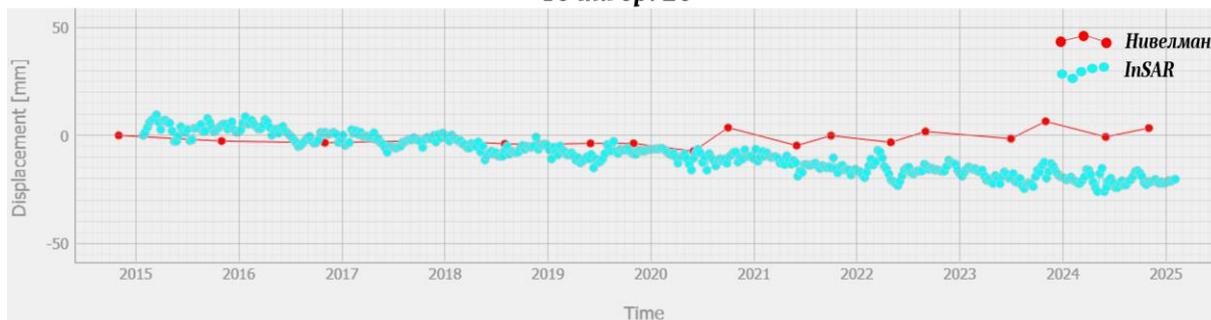
Точка бр. 11



Точка бр. 12



Точка бр. 20



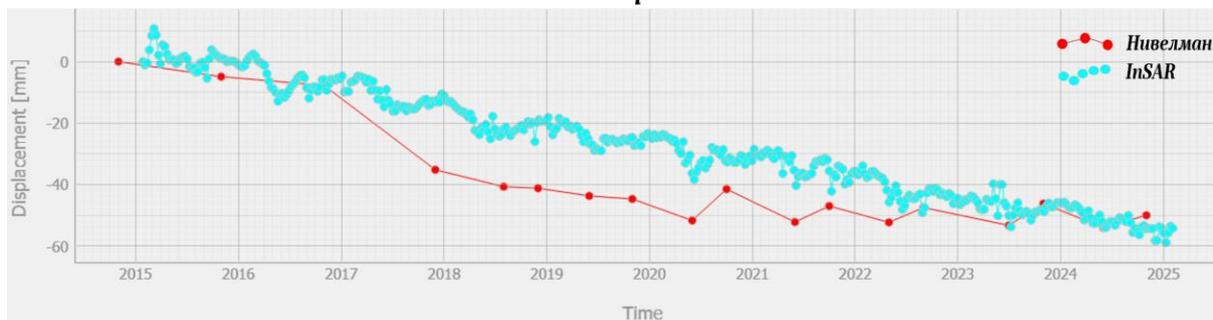
Точка бр. 21



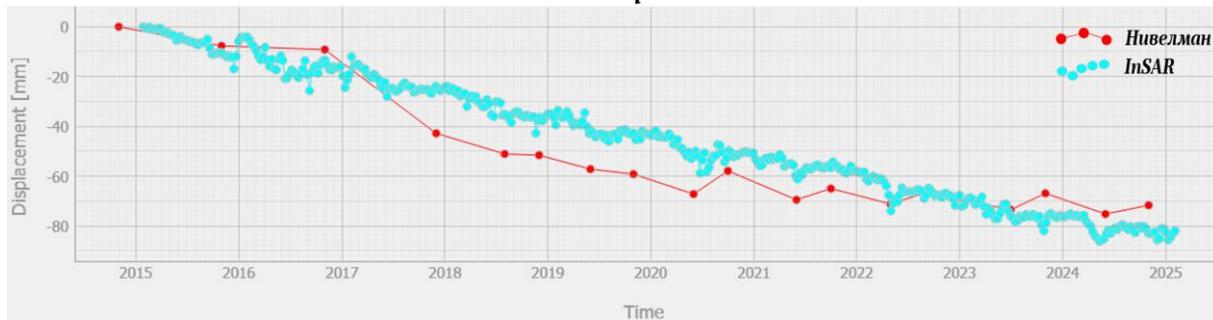
Точка бр. 22



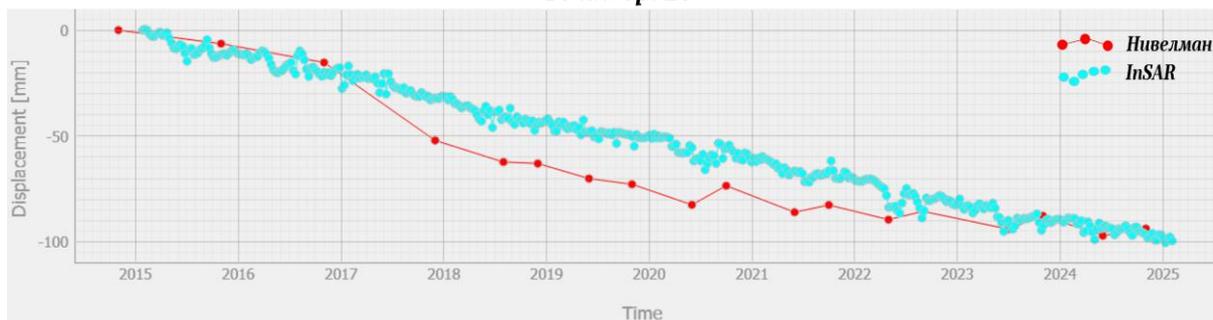
Точка бр. 23



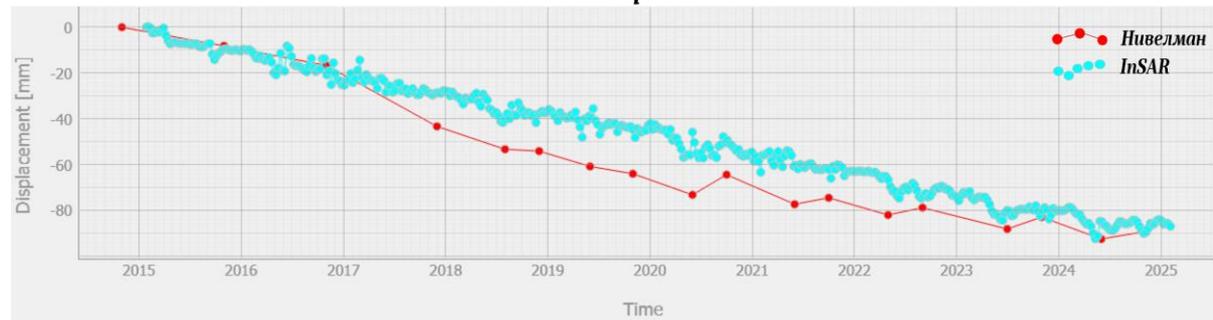
Точка бр. 24



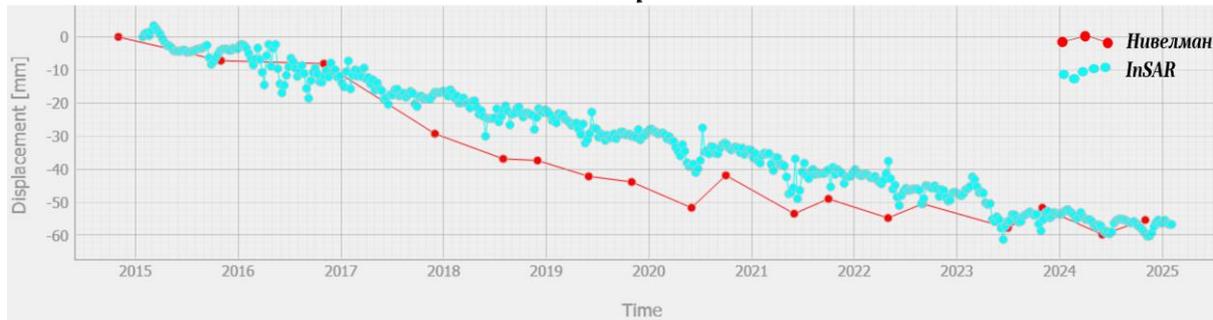
Точка бр. 25



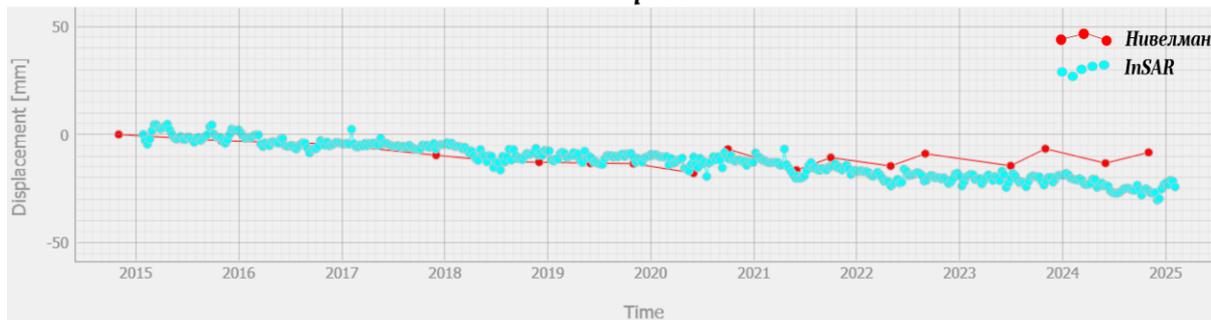
Точка бр. 26



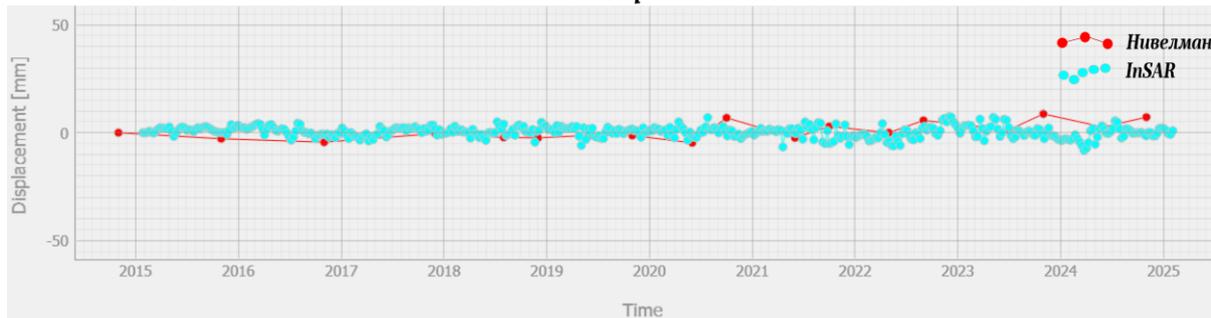
Точка бр. 27



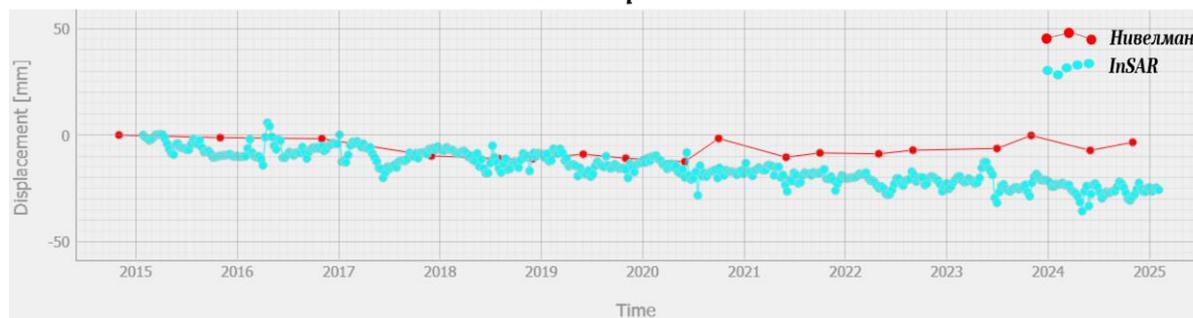
Точка бр. 28



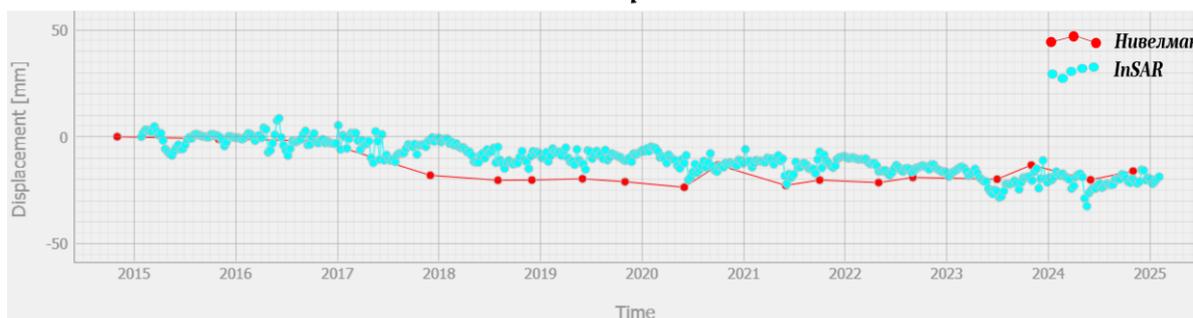
Точка бр. 29



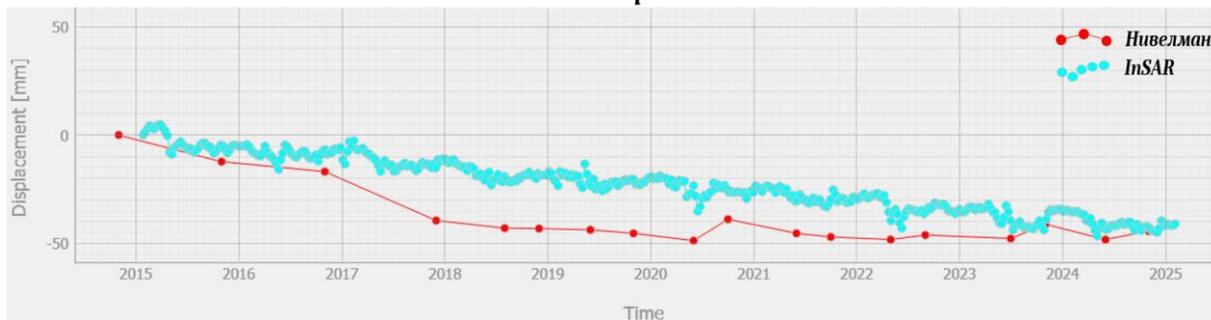
Точка бр. 30



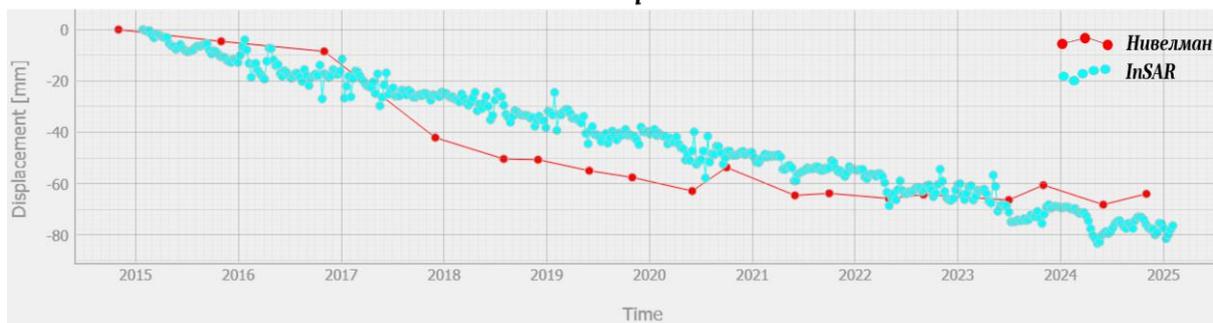
Точка бр. 31



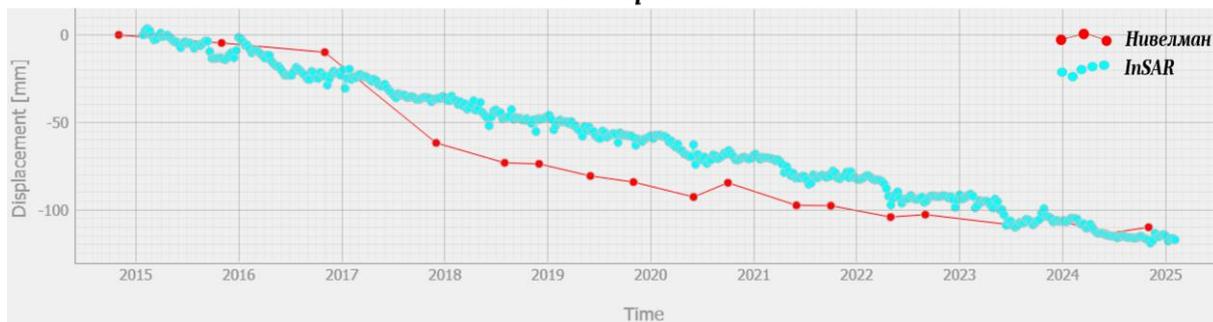
Точка бр. 32



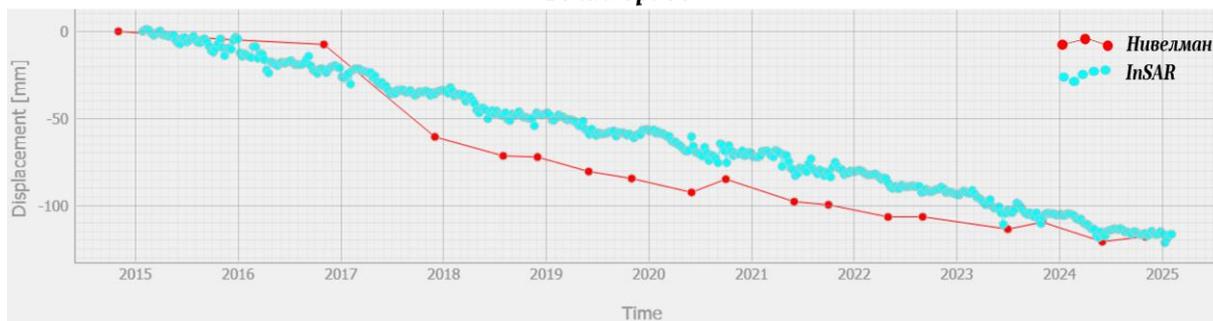
Точка бр. 33



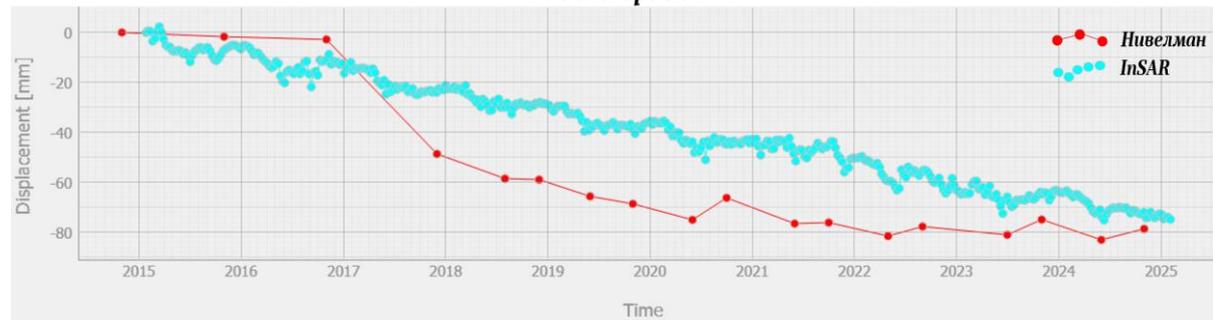
Точка бр. 34



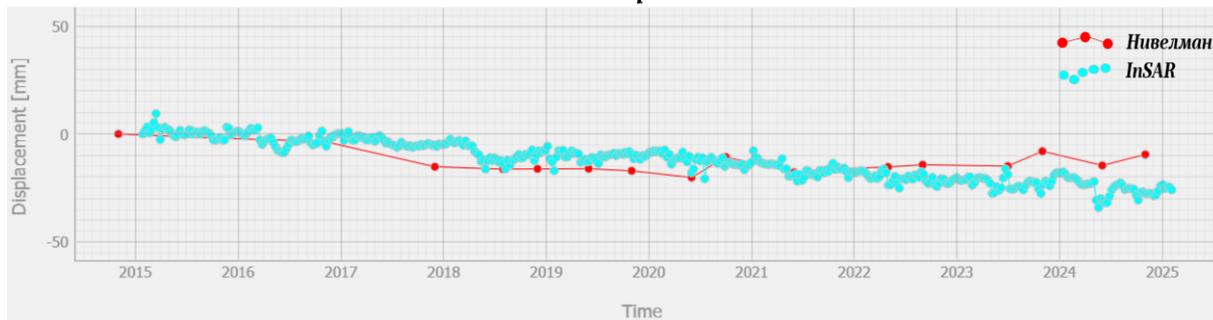
Точка бр. 35



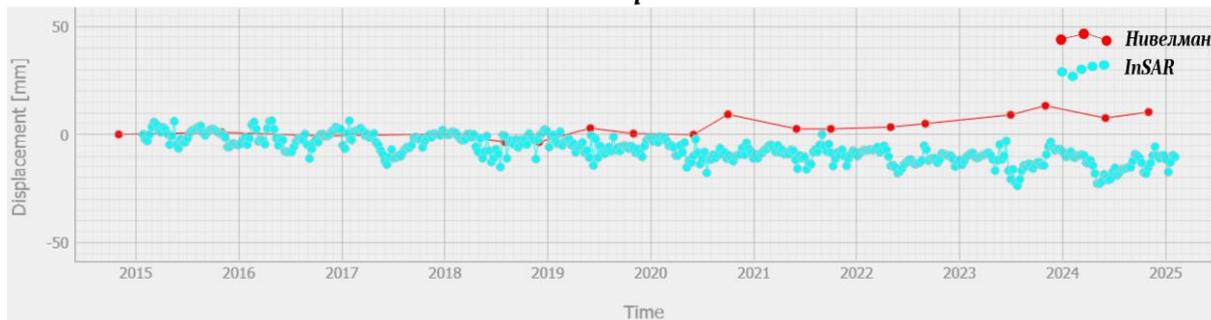
Точка бр. 36



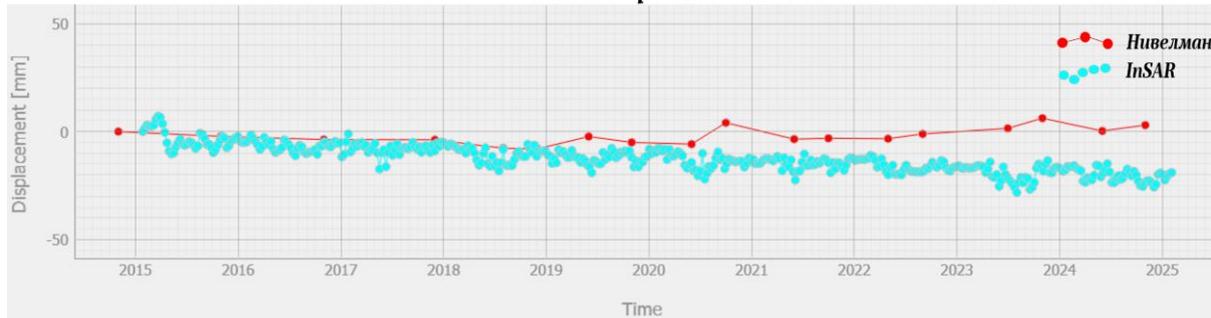
Точка бр. 37



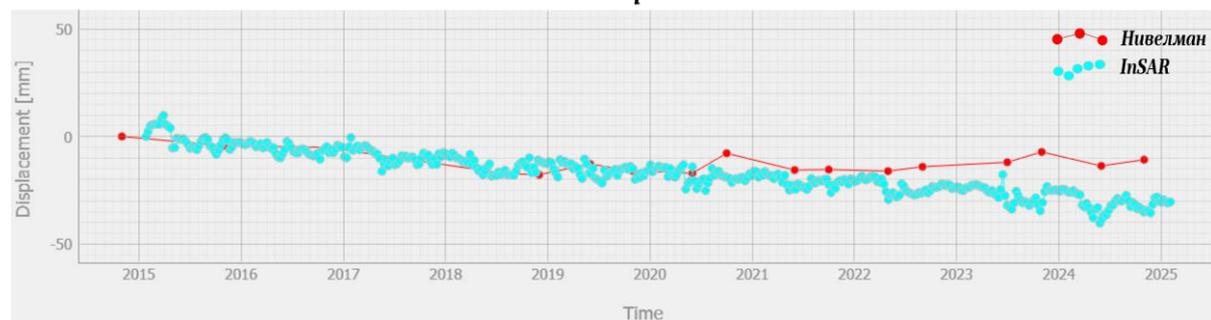
Точка бр. 40



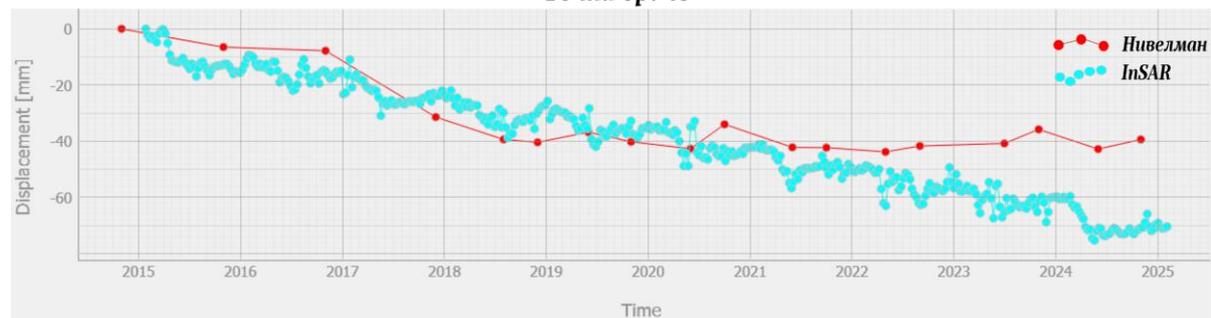
Точка бр. 41



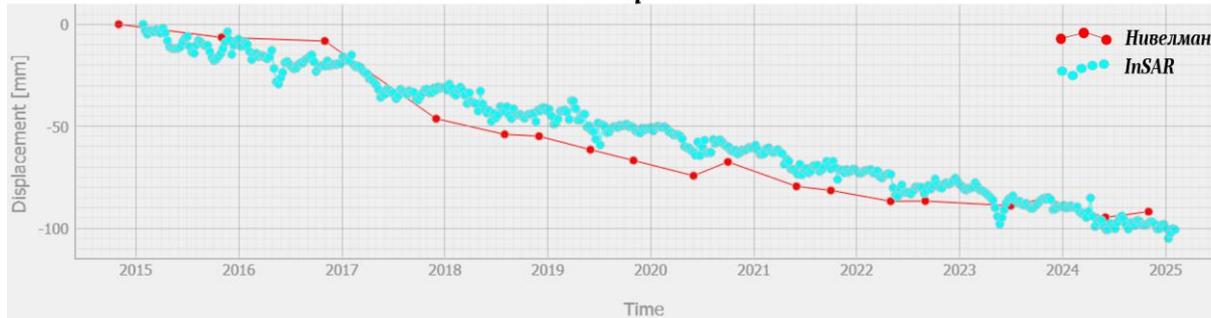
Точка бр. 42



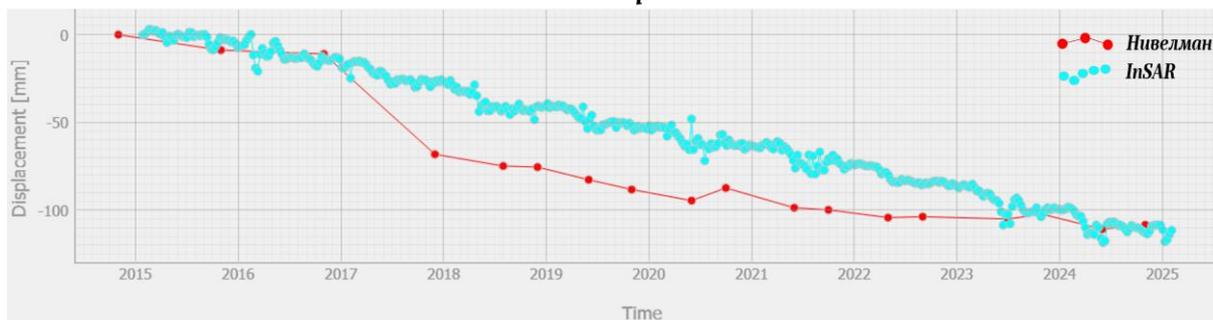
Точка бр. 43



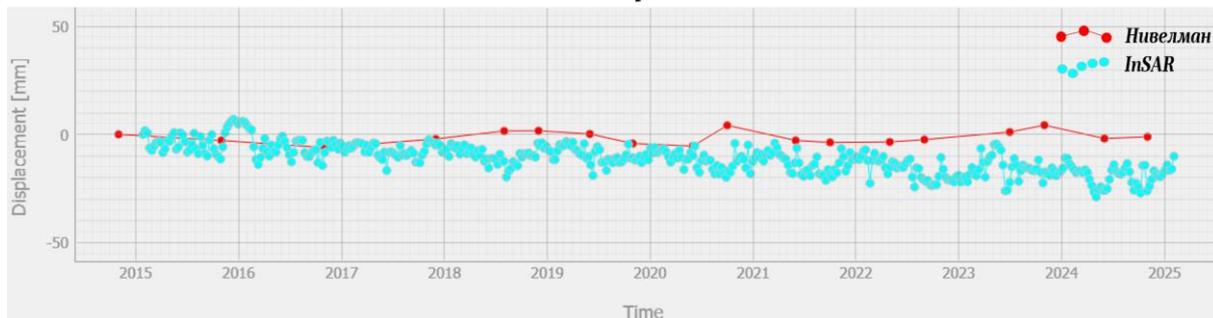
Точка бр. 44



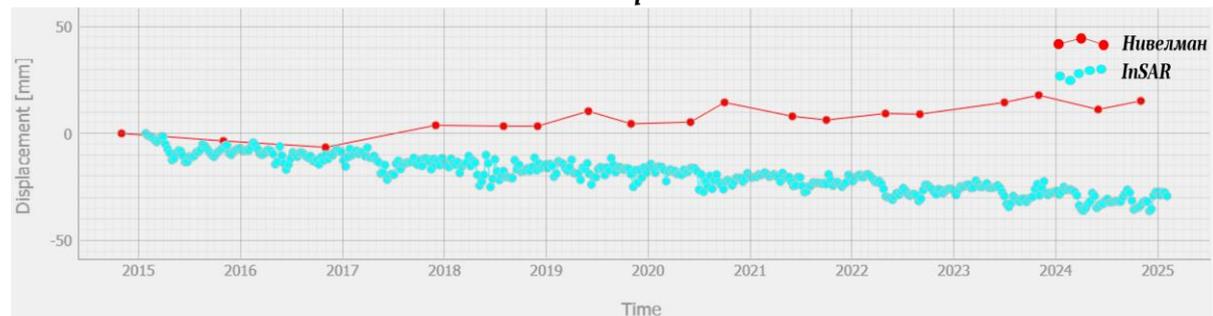
Точка бр. 45



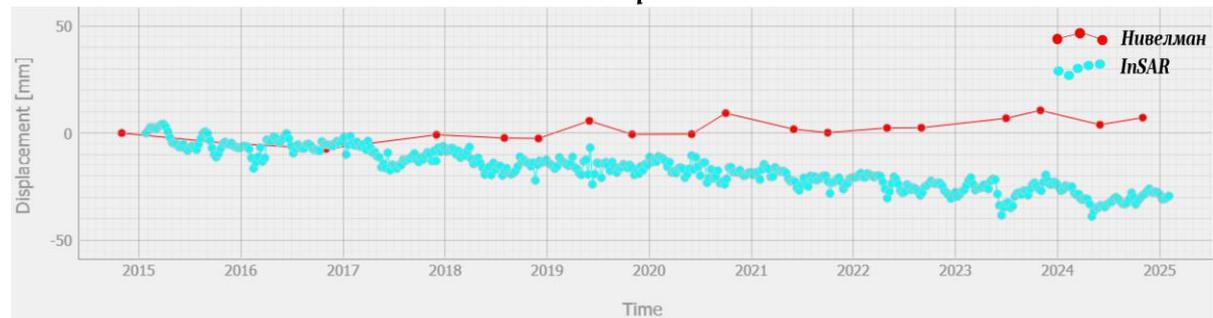
Точка бр. 46



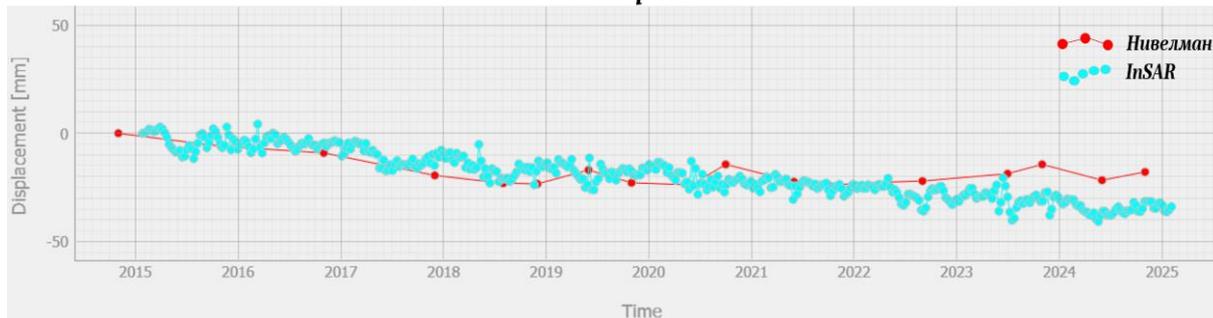
Точка бр. 50



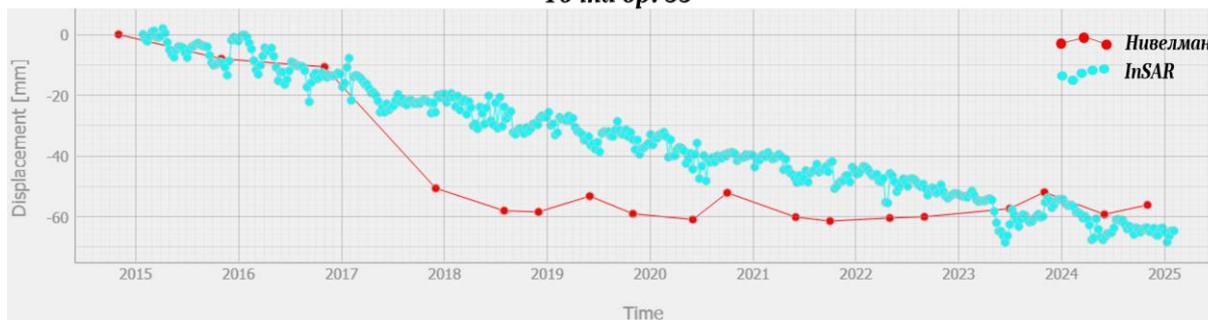
Точка бр. 51



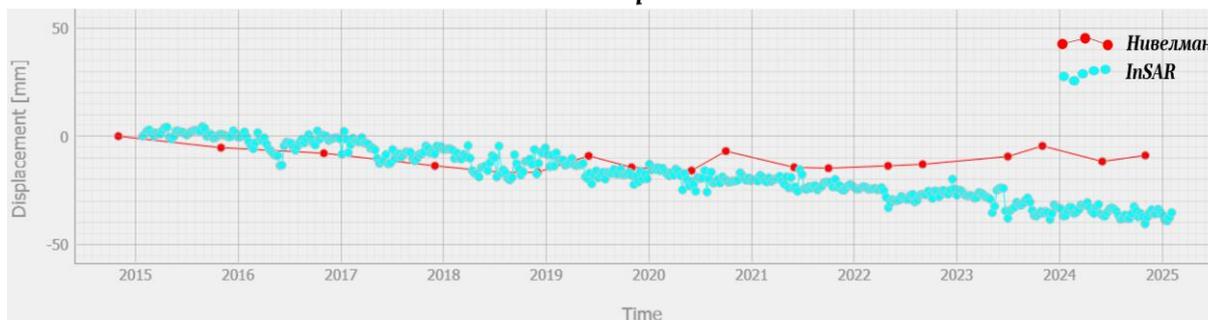
Точка бр. 52



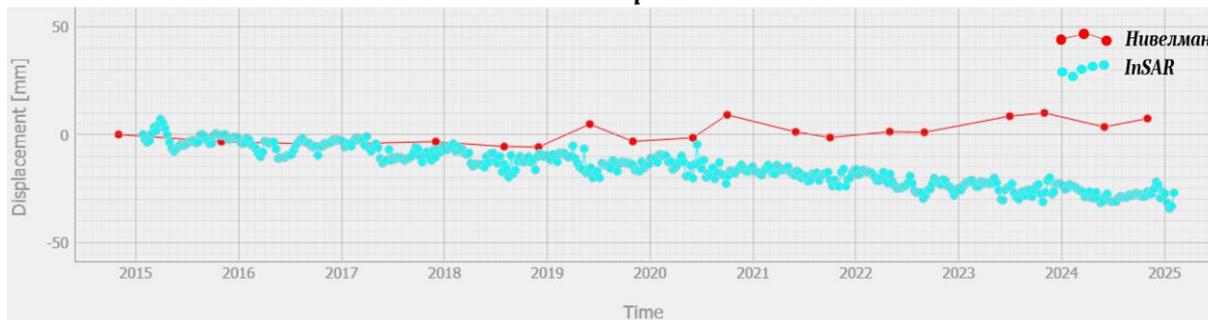
Точка бр. 53



Точка бр. 54



Точка бр. 60



Точка бр. 62

