



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ

UNIVERSITY OF BANJA LUKA

АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ

**МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА
ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА
ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА**

МАСТЕР РАД

Ментор:

Доц. др Сања Туцикешаић

Кандидат:

Владан Јанковић, 01МГЕО/22

Бања Лука, 2023. године



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA

АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY



**МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА
ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА
ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА
МАСТЕР РАД**

Ментор:
Доц. др Сања Туцикешић

Кандидат:
Владан Јанковић, 01МГЕО/22

Бања Лука, 2023. године



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA

АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY



**MODELING OF TECTONIC MOVEMENTS USING
KALMAN FILTER TO TIME SERIES OF GNSS
COORDINATES**
MASTER THESIS

Mentor:
Doc. dr Sanja Tucikešić

Candidate:
Vladan Janković, 01MGEO/22

Banja Luka, 2023. године



Ментор: доц. др Сања Туцикешић, дипл. инж. геод.

Наслов мастер рада: Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске серије GNSS координата

Резиме:

Према теорији тектонских плоча, литосфера је подијељена на веће или мање дијелове који се крећу различитим брзинама. Због тога долази до интеракције на њиховим границама које могу бити конвергентне, дивергентне и трансформне. Посљедица њихове интеркације су сеизмичке и вукланске активности.

Развојем глобалних навигационих сателитских система омогућено је праћење помјерања литосферних плоча. У складу са тим, процјеном координата и њихових промјена током времена изводе се брзине великог броја станица широм Земље, на основу којих се моделују покрети литосферних плоча.

Мастер рад је управо посвећен моделовању тектонских помјерања на основу временских серија GNSS координата које су анализиране примјеном Калман филтера.

Подручје истраживања обухвата територију Јапана која представља једно од сеизмички најактивнијих подручја на Земљи. На овом простору долази до сучељавања Пацифичке, Филипинске, Сјеверноамеричке и Евроазијске плоче. Резултат субдукције Пацифичке и Сјеверноамеричке плоче је разорни земљотрес Тохоку 2011. године.

Посматрањем анализираних временских серија GNSS координата уочени су различити офсети, међу којима се издваја офсет извазан земљотресом Тохоку. Интензитет офсета је сразмјеран растојању посматране станице од епицентра земљотреса. Поред тога, анализом процјењених брзина може се закључити да хоризонтална и вертикална помјерања острва Хоншу нису хомогена, што проистиче из чињенице да се GNSS станице налазе на различитим тектонским плочама.

Циљ истраживања је да се на основу доступних података и алата изврши процјена тектонских помјерања на посматраном подручју и успостави однос између тектонских активности и земљотреса.

Abstract:

According to the theory of tectonic plates, the lithosphere is divided into larger or smaller parts that move at different speeds. Therefore, there is an interaction at their borders that can be convergent, divergent and transformative. The consequences of their interaction are seismic and volcanic activity.

The development of global navigation satellite systems made it possible to monitor the movement of lithospheric plates. Accordingly, by evaluating the coordinates and their changes over time, the velocities of a large number of stations around the Earth are derived, on the basis of which the movements of the lithospheric plates are modeled.

The Master's thesis is dedicated to the modeling of tectonic movements based on time series of GNSS coordinates that were analyzed using the Kalman filter.

The research area includes the territory of Japan, which is one of the most seismically active areas on Earth. In this area, the Pacific, Philippine, North American and Eurasian plates collide. The result of the subduction of the Pacific and North American plates is the devastating Tohoku Earthquake of 2011.

By observing the analyzed time series of GNSS coordinates, various offsets were observed, among which the offset caused by the Tohoku earthquake stands out. The intensity of the offset is proportional to the distance of the observed station from the epicenter of the earthquake. In addition, by analyzing the estimated velocities, it can be concluded that the horizontal and vertical displacements of Honshu Island are not homogeneous, which results from the fact that the GNSS stations are located on different tectonic plates.

The goal of the research is to assess the tectonic movements in the observed area based on the available data and tools and to establish the relationship between tectonic activities and earthquakes.

Кључне ријечи: Геодинамика, тектонска помјерања, сеизмологија, Глобални навигациони сателитски системи, временске серије GNSS координата, Калман филтер

Keywords: Geodynamics, tectonic movements, seismology, Global navigation satellite systems, time series of GNSS coordinates, Kalman filter

Научна област: Геодетски референтни системи

Научно поље: Геодезија

Класификациона ознака: Р 515

Тип одабране лиценце Креативне заједнице: CC BY-NC

Бања Лука, 2023. године



Mentor: doc. dr Sanja Tucikešić, engineer of geodesy

Title of Master Thesis: Modeling of tectonic movements using Kalman filter to time series of GNSS coordinates

Abstract:

According to the theory of tectonic plates, the lithosphere is divided into larger or smaller parts that move at different speeds. Therefore, there is an interaction at their borders that can be convergent, divergent and transformative. The consequences of their interaction are seismic and volcanic activity.

The development of global navigation satellite systems made it possible to monitor the movement of lithospheric plates. Accordingly, by evaluating the coordinates and their changes over time, the velocities of a large number of stations around the Earth are derived, on the basis of which the movements of the lithospheric plates are modeled.

The Master's thesis is dedicated to the modeling of tectonic movements based on time series of GNSS coordinates that were analyzed using the Kalman filter.

The research area includes the territory of Japan, which is one of the most seismically active areas on Earth. In this area, the Pacific, Philippine, North American and Eurasian plates collide. The result of the subduction of the Pacific and North American plates is the devastating Tohoku Earthquake of 2011.

By observing the analyzed time series of GNSS coordinates, various offsets were observed, among which the offset caused by the Tohoku earthquake stands out. The intensity of the offset is proportional to the distance of the observed station from the epicenter of the earthquake. In addition, by analyzing the estimated velocities, it can be concluded that the horizontal and vertical displacements of Honshu Island are not homogeneous, which results from the fact that the GNSS stations are located on different tectonic plates.

The goal of the research is to assess the tectonic movements in the observed area based on the available data and tools and to establish the relationship between tectonic activities and earthquakes.

Резиме:

Према теорији тектонских плоча, литосфера је подијељена на веће или мање дијелове који се крећу различитим брзинама. Због тога долази до интеракције на њиховим границама које могу бити конвергентне, дивергентне и трансформне. Последица њихове интеркације су сеизмичке и вулканске активности.

Развојем глобалних навигационих сателитских система омогућено је праћење помјерања литосферних плоча. У складу са тим, процјеном координата и њихових промјена током времена изводе се брзине великог броја станица широм Земље, на основу којих се моделују покрети литосферних плоча.

Мастер рад је управо посвећен моделовању тектонских помјерања на основу временских серија GNSS координата које су анализиране примјеном Калман филтера.

Подручје истраживања обухвата територију Јапана која представља једно од сеизмички најактивнијих подручја на Земљи. На овом простору долази до сучељавања Пацифичке, Филипинске, Сјеверноамеричке и Евроазијске плоче. Резултат субдукције Пацифичке и Сјеверноамеричке плоче је разорни земљотрес Тохоку 2011. године.

Посматрањем анализираних временских серија GNSS координата уочени су различити офсети, међу којима се издваја офсет изазван земљотресом Тохоку. Интензитет офсета је сразмјеран растојању посматране станице од епицентра земљотреса. Поред тога, анализом процјењених брзина може се закључити да хоризонтална и вертикална помјерања острва Хоншу нису хомогена, што проистиче из чињенице да се GNSS станице налазе на различитим тектонским плочама.

Циљ истраживања је да се на основу доступних података и алата изврши процјена тектонских помјерања на посматраном подручју и успостави однос између тектонских активности и земљотреса.

Keywords: Geodynamics, tectonic movements, seismology, Global navigation satellite systems, time series of GNSS coordinates, Kalman filter

Кључне ријечи: Геодинамика, тектонска помјерања, сеизмологија, Глобални навигациони сателитски системи, временске серије GNSS координата, Калман филтер

Scientific Area: Geodetic reference systems

Scientific Field: Geodesy

Classification Mark: P 515

The Type of Selected Creative Community License: CC BY-NC



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA

АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY



ЗАДАТАК ЗА МАСТЕР РАД

Предмет: Геодетска геодинамика

Ментор: доц. др Сања Туцикешаић, дипл. инж. геод.

Кандидат: Владан Јанковић, дипл. инж. геод., 01МГЕО/22

ТЕМА: МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА

Задатак мастер рада на тему „*Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске серије GNSS координата*“ представља утврђивање могућности Калман филтер приликом анализе временских серија GNSS координата, са циљем добијања брзина GNSS станица за потребе моделовања тектонских помјерања.

Завршни рад је самосталан рад кандидата, који је реализован уз консултације са предметним наставником и сарадницима.

Предметни наставник:

доц. др Сања Туцикешаић, дипл. инж. геод.

Бања Лука, 2023. године.

САДРЖАЈ

1.	УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	1
1.1.	Предмет и циљ истраживања.....	3
1.2.	Полазне хипотезе	3
1.3.	Методе истраживања	4
1.4.	Структура рада	5
2.	ГЕОДИНАМИКА.....	7
2.1.	Тектоника плоча.....	8
2.2.	Сеизмологија	10
2.2.1.	Могућности анализе временских серија GNSS координата за предвиђање сеизмичких активности	14
2.2.2.	Упозорење на земљотрес у реалном времену	15
2.3.	Геодетске технике мјерења за геодинамичка истраживања	16
2.4.	Развој GNSS мрежа за геодинамику	18
3.	ГЛОБАЛНИ НАВИГАЦИОНИ САТЕЛИТСКИ СИСТЕМИ.....	21
3.1.	Основни концепт GNSS позиционирања.....	22
3.2.	Типови GNSS позиционирања.....	24
3.3.	Подјела GNSS система	26
3.3.1.	Глобални позициони систем GPS	26
3.3.2.	Глобални навигациони сателитски систем GLONASS.....	27
3.3.3.	BeiDou.....	28
3.3.4.	Galileo	29
3.4.	Примјена GNSS система	30
4.	ГЛОБАЛНИ ПОЗИЦИОНИ СИСТЕМ.....	33
4.1.	Архитектура система	33
4.2.	Структура GPS сигнала	35
4.3.	Извори грешака приликом мјерења	36
4.3.1.	Грешке сателитског поријекла	37

4.3.2.	Грешке услед простирања сигнала кроз атмосферу.....	38
4.3.3.	Грешке пријемника и антене	39
4.4.	Математички модел GPS мјерења.....	40
4.4.1.	Функционални модел GPS мјерења	40
4.4.2.	Стохастички модел GPS мјерења.....	41
5.	ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ.....	42
5.1.	Дефиниција и подјела временских серија	42
5.2.	Математички модел временске серије GNSS координата	46
5.3.	Анализа временских серија.....	48
6.	КАЛМАНОВ ФИЛТЕР	51
6.1.	Уопштено о Калмановом филтеру	52
6.2.	Нелинеарни Калманов филтер.....	53
6.3.	Примјена	54
7.	МОДЕЛОВАЊЕ ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА GNSS КООРДИНАТА.....	55
7.1.	Подручје истраживања	55
7.2.	Приступ подацима	56
7.3.	Примјена SARI софтвера за анализу временских серија	59
7.4.	Анализа добијених резултата	64
8.	ЗАКЉУЧАК.....	68
9.	ЛИТЕРАТУРА	71
10.	СПИСАК ПРИЛОГА	75

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА И АКРОНИМА

GNSS	Global Navigation Satellite Systems
SARI	Señales y Análisis de Ruido Interactivo
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
SLR	Satellite Laser Ranging
GPS	Global Positioning System
EKF	Extended Kalman Filter
UKF	Unscented Kalman Filter
EUREF	Reference Frame Sub-Commission for Europe
PGGA	Permanent GPS Geodynamic Array
SCIGN	Southern California Integrated GPS Network
GEONET	GPS Earth Observation Network System
GSI	Geospatial Information authority of Japan
GLONASS	Глобальная Навигационная Спутниковая Система
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
NAVIC	Navigation with Indian Constellation
PPP	Precise Point Positioning
IGS	International GNSS Service
JPL	Jet Propulsion Laboratory
RTK	Real-Time Kinematic
SPS	Standard Positioning Service
PPS	Precise Positioning Service
GEO	Geostationary Orbit
MEO	Medium-altitude Earth Orbit
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbits
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
OS	Open Service
CS	Commercial Service
SoL	Safety-of-Life Service
PRS	Public Regulated Service
SAR	Search and Rescue Service
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame

GST	Galileo System Time
TAI	International Atomic Time
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
TEC	Total Electron Content
MCS	Master Control Station
PRN	Pseudo Random Noise
PDF	Probability Density Function
LSE	Least-squares estimation
NGL	Nevada Geodetic Laboratory
USGS	United States Geological Survey
RTS	Rauch-Tung-Striebel

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 1. Карактеристике GNSS система [5]	21
Табела 2. Координате станица.....	59
Табела 3. Подаци о временској серији за станицу I053	61
Табела 4. Процијењене вриједности брзина GNSS станица.....	64
Табела 5. Интензитет резултантног вектора помјерања	64
Табела 6. Удаљеност GNSS станица од епицентра Тохоку земљотреса	65

СПИСАК СЛИКА

Слика 1. Унутрашња структура Земље [3].....	7
Слика 2. Тектонске плоче и типови међусобних граница [6]	9
Слика 3. Границе литосферних плоча [7]	9
Слика 4. Примарни и секундарни таласи [10]	11
Слика 5. Love и Rayleigh таласи [10].....	12
Слика 6. Поље деформације и брзине деформације [11], [14]	14
Слика 7. Ток развоја континуираних GNSS мрежа [20]	19
Слика 8. Принцип мјерења времена простирања сигнала [5]	23
Слика 9. Трилатерациона метода позиционирања [20]	23
Слика 10. Констелација GPS сателита [22].....	26
Слика 11. Констелација GLONASS сателита [20].....	27
Слика 12. Констелација BeiDou сателита [23].....	28
Слика 13. Констелација Galileo сателита [24]	29
Слика 14. Примјена GNSS за научна истраживања [20]	30
Слика 15. Карта густине електрона у јоносфери изражена у јединици TEC [5].....	31
Слика 16. Компоненте GPS система [26]	34
Слика 17. Контролне станице за праћење GPS сателита [27]	35
Слика 18. Структура GPS сигнала [29]	36
Слика 19. Бијели шум [33].....	43
Слика 20. Теоретски PDF и симулирани хистограм бијелог Гаусовог шума [34]	44
Слика 21. Шум треперења [33]	44
Слика 22. Шум случајног хода [33]	45
Слика 23. Различити типови временских серија: а) константан процес, б) процес са трендом, в) серија са цикличним варијацијама и г) серија са сезонским варијацијама [32].....	46
Слика 24. Методе анализе GNSS временских серија [37]	49
Слика 25. Три типа процјене у одређеном тренутку времена [38]	51
Слика 26. Распоред тектонских плоча на подручју истраживања [43]	56
Слика 27. Доступни подаци на веб сервису NGL [44].....	57
Слика 28. Дужина временских серија за GPS станице чије податке обрађује NGL [45].....	58
Слика 29. Позиције станица	58
Слика 30. Улазни подаци у пец формату	60

Слика 31. Сјеверна компонента временске серије са станице I053.....	61
Слика 32. Периодограм сјеверне компоненте временске серије I053.....	62
Слика 33. Моделовање сјеверне компоненте станице I053 примјеном Калмановог филтера	62
Слика 34. Модел резидуала за сјеверну компоненту станице I053	63
Слика 35. Хистограм резидуала сјеверне компоненте станице I053.....	63
Слика 36. Излазни резултати моделовања	63
Слика 37. Интеракција тектонских плоча која је резултирала Тохоку земљотресом [47].....	65
Слика 38. Положај полуострва Изу у односу на распоред тектонских плоча [48]....	67

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Теорија тектонике плоча формулисана је шездесетих година двадесетог вијека на основу Wegener-ове хипотезе о плутању континената. Према теорији, Земља има крути вањски слој који се назива литосфера, најчешће дебљине око 100 km, испод којег се налази пластични слој, односно астеносфера. Литосфера је подијељена на седам плоча величине континената и океана, неколико регионалних плоча и одређени број микроплоча.

Плоче се крећу брзинама од неколико милиметара па до десетак центиметара годишње и међусобно реагују дуж граница. Као последица кретања плоча на њиховим границама долази до дивергирања, конвергирања и смицања плоча, што доводи до сеизмичких и вулканских активности. Због тога се већина активних вулкана јавља управо у зонама реаговања тектонских плоча, а примјер тога је Пацифички ватрени прстен.

Развој геодетских техника мјерења омогућио је опажање тренутних помјерања и брзина литосферних плоча. Према томе, опажањем координата и њихових временских промјена за велики број станица широм Земље, могу се извести брзине кретања литосферних плоча.

Геодинамичка истраживања заснивају се на праћењу временских серија GNSS (енгл. Global Navigation Satellite Systems) координата током времена, на основу којих се добијају информације о помјерањима GNSS станица и њиховим брзинама које се крећу током времена.

Глобални навигациони сателитски системи имају широку примјену у геодинамичким истраживањима, укључујући студије помјерања тектонских плоча и деформација границе плоча, земљотресе и сеизмологију, вулканске деформације, и друге геодинамичке појаве.

Тема мастер рада је управо моделовање тектонских помјерања на основу GNSS технологије мјерења. Резултат континуираних GNSS мјерења представљају временске серије GNSS координата над којима је примјењен Калманов филтер. За обраду временских серија биће кориштен софтвер отвореног кода SARI (франц. Señales y Análisis de Ruido Interactivo).

Тест подручје обухвата територију Јапана која представља једно од сеизмички најактивнијих подручја на Земљи. Јапан је смјештен на тектонски врло нестабилном дијелу Земље, гдје се сударају Пацифичка, Филипинска, Сјеверноамеричка и

Евроазијска плоча, што доводи до честих земљотреса, од којих су неки и разорни као на примјер Тохоку земљотрес 2011. године.

Почетком деведесетих година двадесетог вијека примјеном GNSS технологије почеле су се развијати континуиране GNSS мреже, помоћу којих су праћене деформације Земљине коре. Једна од првих континуираних GNSS мрежа са размаком од око 1000 km успостављена је у Јапану. Овакве мреже су развијане примарно за мјерење деформација везаних за тектонске процесе.

Данашње студије кретања тектонских плоча се заснивају на помјерањима или брзинама изведеним из временских серија станица изражених у међународном терестричком референтном оквиру ITRF (енгл. International Terrestrial Reference Frame). Поред GNSS за геодинамичка истраживања се користе и друге технике мјерења као нпр. VLBI (енгл. Very long baseline interferometry) и SLR (енгл. Satellite laser ranging).

Временска серија се користи за праћење неке статистичке појаве и представља уређени низ мјерења, који је реализован у различитим епохама, најчешће у једнаким временским интервалима. Временске серије GNSS координата нуде врло прецизне процјене положаја и брзина GNSS антене, што заправо представља основне податке за геодинамичка истраживања.

Анализом временских серија постиже се проналажење модела помоћу којег се описује законитост у понашању одређеног динамичког система и предвиђа његово будуће стање на основу познатих стања у садашњости и прошлости.

Калманово филтрирање је алгоритам који користи низ мјерења опажаних током времена, укључујући статистички шум и друге непрецизности, и врши процјене непознатих варијабли. То је заправо рекурзивни метод који се користи за процјену случајног стања динамичког система на начин који минимизира средњу квадратну грешку предвиђања. Рекурзивни метод се односи на приступ рјешавања проблема тако што се проблем декомпонује на мање дијелове истог проблема, који се затим рјешавају на исти начин. Алгоритам омогућује оптимално оцјењивање временски промјенљивих параметара динамичког система. Калманов филтер је посебно погодан за обраду сателитских мјерења, јер се координате станица и њихове брзине, фазне неодређености, атмосферски утицаји или стања часовника могу посматрати као параметри који се мијењају у функцији времена. Проширени Калманов филтер представља нелинеарну верзију Калмановог филтера који линеаризује процјену тренутне средње вриједности и коваријансе, а користи се у теорији процјене нелинеарног стања навигационих система и GPS-а (енгл. Global Positioning System).

1.1. Предмет и циљ истраживања

Тектоника плоча и геодинамичка активност на Земљи данас су један од најзначајнијих научних изазова, у којем прецизно одређивање положаја помоћу сателита може дати значајан допринос. Преко глобалних, континенталних и регионалних мјерења долази се до детаљнијег увида у узроке локалног помјерања Земљине коре.

Геодинамичка истраживања су напредовала са развојем GNSS теологије. Велики значај за геодинамичка истраживања имају временске серије GNSS координата, посебно континуирана GNSS мјерења. Временске серије GNSS координата се примјењују за проучавање кретања тектонских плоча, деформација Земљине коре које настају као посљедица земљотреса, вулкана и других геофизичких појава.

Предмет овог мастер рада представља анализа временских серија GNSS координата континуираних мјерења примјеном Калмановог филтера и моделовање површинских деформација, односно кретања литосферних плоча примјеном алата отвореног кода.

Временске серије GNSS координата континуираних мјерења су преузете са следећих GNSS станица које се налазе на јапанском острву Хоншу:

1. J549 – налази се у префектури Miyagi у близини града Higashimatsushima,
2. J191 – налази се у префектури Akita у близини града Nikaho,
3. I053 – налази се у префектури Shizuoka у близини града Kawazu,
4. J645 – налази се у префектури Hyogo у близини града Kami.

Истраживање сеизмичког циклуса уско је повезано са анализом деформација Земљине коре која се може извршити на основу временских серија GNSS координата.

На основу полазног проблема и предмета истраживања постављени су основни циљеви истраживања:

- Анализа досадашњих истраживања везаних за примјену GNSS алата у геодинамичким истраживањима.
- На основу доступних података и алата потребно је извршити процјену тектонских помјерања подручја истраживања и успоставити однос између површинских деформација и тектонских активности.

1.2. Полазне хипотезе

У склопу мастер рада дефинисане су следеће хипотезе:

1. Општа хипотеза:

На основу анализе отворених података временских серија GNSS координата примјеном Калмановог филтера могу се моделовати тектонска помјерања на подручју Јапана.

2. Алтернативна хипотеза:

Примјеном Калмановог филтера на анализиране отворене податке временских серија GNSS координата, може се донијети закључак да постоји веза између тектонских помјерања на подручју Јапана и земљотреса, што указује на могућност кориштења овакве методологије у предвиђању земљотреса.

Постоје различити узроци земљотреса који се по извору настанка могу подијелити на природне и антропогене. Поред све масовнијих истраживања сеизмичких активности сам процес и узрок настанка земљотреса још увијек није довољно схваћен. Велику улогу у данашњим истраживањима имају континуирана GNSS мјерења и временске серије GNSS координата. За адекватну анализу и интерпретацију временских серија GNSS координата биће кориштен програм отвореног кода SARI.

1.3. Методе истраживања

Планирано истраживање за потребе израде мастер рада представља комбинацију различитих научних метода у циљу евалуације постављених хипотеза. С тим у вези извршена је анализа научне и стручне литературе која се односи на временске серије GNSS координата, као и литература за употребу софтвера SARI.

Током овог истраживања најрелевантије су слједеће научне методе:

- **Аналитичка метода**, којом се врши рашчлањивање једне цјелине на њене дијелове или елементе;
- **Синтетичка метода**, којом се преко једноставнијих форми и појмова долази до сложенијих;
- **Индуктивна метода**, којом се долази до општих закључака полазећи од појединачних премиса;
- **Дедуктивна метода**, којом се полазећи од општих знања долази до посебних и појединачних закључака;
- **Метода генерализација**, којом се врши уопштавање од посебног појма до уопштенијег;
- **Дескриптивна метода**, која се користи за описивање различитих чињеница, процеса и појава у природи;

- **Компаративна метода** је концепт упоређивања између двије појаве или процеса;
- **Метода моделовања**, којом се генерише знаковни систем помоћу којег се може замијенити предмет који се истражује.

1.4. Структура рада

Мастер рад се састоји од осам поглавља, гдје прво поглавље представља увод у сам рад. У њему су описана уводна разматрања, као и предмет и циљ истраживања. Поред тога, наведене су полазне хипотезе и научне методе које су спроведе у циљу теситрања поменутих хипотеза.

Друго поглавље посвећено је геодинамици, која се бави геолошким процесима у Земљиној унутрашњости. Посебан акценат је стављен на теорију о тектонским плочама чија кретања доводе до сеизмолошких активности које су такође обрађене. Затим, наведене су и геодетске технике мјерења које се користе за геодинамичка истраживања, као и мреже тачака над којима се спроводе поменуте технике.

У трећем поглављу објашњен је основни концепт позиционирања Глобалним навигационим сателитским системима. Уз то набројани су различити типови GNSS позиционирања са њиховим основним карактеристикама. Извршена је подјела GNSS система и побројане су области унутар којих се они примјењују.

Четврто поглавље рада описује Глобални позициони систем, који се данас често користи као синоним за све GNSS системе, из разлога што је то заправо први потпуно оперативни систем. Унутар поглавља сагледани су: архитектура система, структура сигнала које систем користи, као и извори грешака који утичу на мјерења. На крају је дефинисан математички модел GPS мјерења.

У петом поглављу дефинисане су временске серије GNSS координата и извршена је њихова подјела. Поред тога, описани су различити поступци анализе временских серија.

Шесто поглавље укратко описује Калманов филтер, његове нелинеарне варијације EKF (енгл. Extended Kalman Filter) и UKF (енгл. Unscented Kalman Filter), као и примјену у различитим областима.

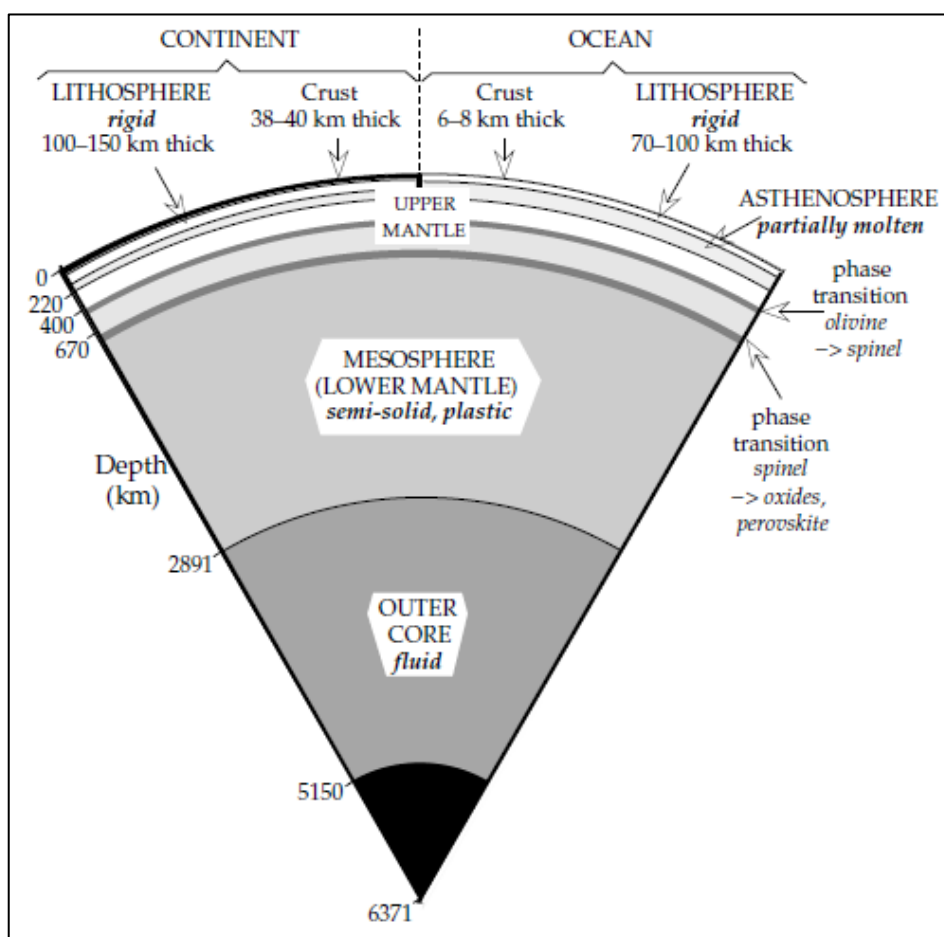
У седмом поглављу приказан је практични дио рада који започиње описом самог подручја истраживања. Затим су представљене врсте података геодетске лабораторије у Невади, као и основе функционалности софтверског алата SARI. На крају је извршена анализа добијених резултата на основу обраде временских серија GNSS координата описаним софтвером.

Осмо поглавље садржи основне закључке изведе на основу анализе досадашњих истраживања везаних за примјену GNSS алата у геодинамичким истраживања и на основу остварених резултата у експерименталном дијелу мастер рада.

2. ГЕОДИНАМИКА

Геодинамика је термин који се обично користи за моделе понашања планете Земље великих размјера, који се обично дефинишу математички и рјешавају рачунањем [1].

Прије свега неопходно је дати пар напомена о познавању унутрашње, односно структурне грађе Земље. На основу проучавања сеизмичких таласа почетком двадесетог вијека, постало је јасно да унутрашњост Земље има радијално слојевиту структуру као што је приказано на слици 1. До сазнања о структурној грађи Земље се долази на основу простирања лонгитудиналних и попречних таласа који се јављају као рекација на земљотресе. Брзине простирања таласа су у директној вези са притиском, температуром, минералологијом и хемијским саставом Земљине унутрашњости. На основу промјене брзине сеизмичких таласа Земља је подијељена на три основне геосфере: Земљину кору, омотач језгра и језгро [2].



Слика 1. Унутрашња структура Земље [3]

Научник Мохоровичић А. је 1909. године открио да на дубинама од неколико десетина километара испод континената, и мање од десет километара испод океана

сеизмичке брзине нагло расту. Овај сеизмички дисконтинуитет представља границу између Земљине коре и омотача језгра.

Земљина кора је подијељена на континенталну и океанску. Континентална кора је просјечне дебљине 30-40 km, док испод планинских вијенаца досеже и до 70 km. У односу на континенталну кору, океанска кора је много тања и њена дебљина износи 5-8 km [4].

Разлика постоји и у саставу и густини између континенталне и океанске коре. Континентална кора се састоји од гранитних и метаморфних стијена и њена просјечна густина износи $2.7-2.8 \text{ g/cm}^3$. Океанска кора се састоји од базалтних стијена, при чему густина океанске коре у просјеку износи 3.0 g/cm^3 .

Омотач језгра се може подијелити на горњи и доњи слој. Горњи слој омотача се простире од Мохо дисконтинуитета до 660 km дубине и обухвата доњи дио литосфере и горњи дио астеносфере. Доњи дио омотача се затим наставља од дисконтинуитета на 660 km до 2900 km. Главна карактеристика је повећање брзине и густине као одговор на све већу хидростатичку компресију. Доњи слој омотача се такође назива и мезосфера.

Спољашње језгро се простире од 2900 km до 5200 km, гдје започиње унутрашње језгро које се протеже до центра Земље. Непропуштање S-таласа кроз спољашње језро сугерише да је оно течено, док их унутрашње преноси веома малим брзинама што указује да је близу тачке топљења.

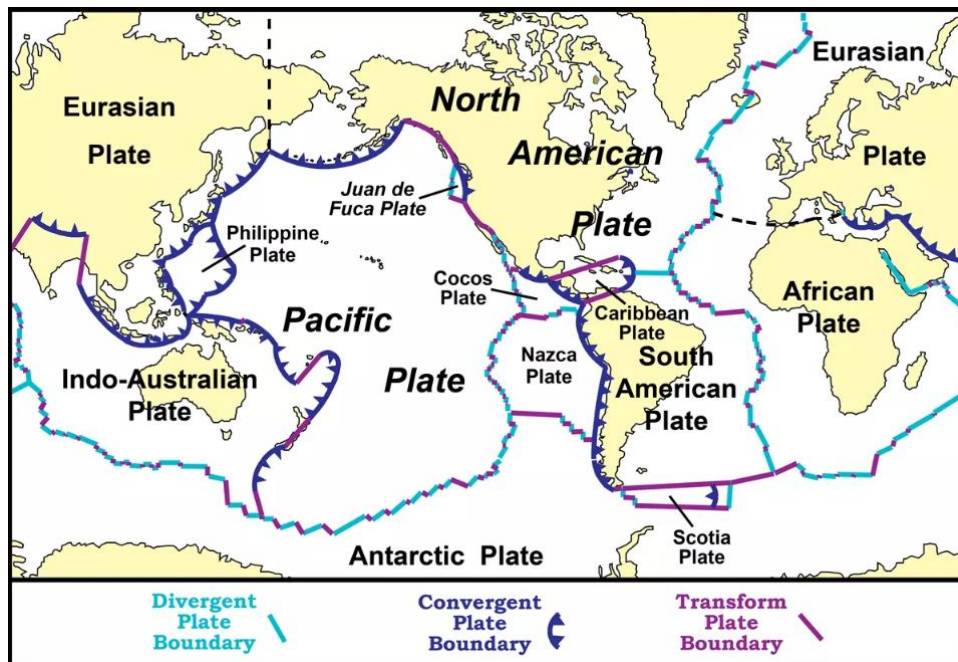
Земљино језгро и његов омотач играју важну улогу у еволуцији коре и обезбјеђују термичке и механичке покретачке силе које доводе до тектонике плоча [2].

2.1. Тектоника плоча

Процеси тектонике плоча трају милионима година и односе се на помјерање литосферних плоча брзинама од неколико центиметара годишње. Тензије акумулиране тектоником плоча нагло се ослобађају у виду земљотреса. Том приликом сеизмички таласи путују кроз Земљину унутрашњост брзинама од неколико километара у секунди [5].

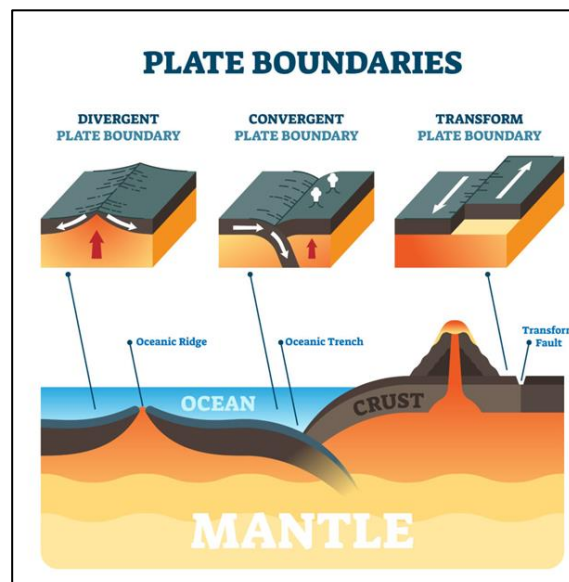
Тектоника плоча обухвата два горња слоја Земље – литосферу и астеносферу. Назив тектоника плоча потиче од чврстих литосферних плоча које формирају горњи слој Земље. Саме плоче су различитих величина. Дебљина плоча варира између 70 и 150 km. Она је већа испод континентата, у односу на океанско дно, док испод планинских масива дебљина расте и до 200 km. Литосфера је подијељена на седам

плоча величине континента и океана, шест регионалних плоча и неколико мањих плоча (слика 2). Испод литосфере се налази астеносфера која је дјеломично растопљена. Астеносфера има важну улогу у тектоници плоча, јер омогућава релативна кретања површинских литосферних плоча. Литосферне плоче се крећу различитим брзинама и у различитим правцима.



Слика 2. Тектонске плоче и типови међусобних граница [6]

Земљотреси настају дуж граница између литосферних плоча, као посљедица њиховог кретања и реакције између њих. Постоје различити случајеви њиховог помјерања: дивергентно (раздвајање плоча), конвергентно (кретање плоча једне према другој) и трансформно (смицање једне поред друге). Врсте различитих граница приказане су на слици 3.



Слика 3. Границе литосферних плоча [7]

Конвергентне границе се јављају приликом кретања плоча једне према другој. У том случају се тежа кора подвлачи испод лакше и тај процес се назива субдукција. Приликом сударања океанске и континенталне плоче долази до урањања океанске под континенталну плочу из разлога што је океанска кора тежа. У овом процесу се на рубовима континенталних плоча издижу високе планине као нпр. Анди. Поред тога, јављају се и случајеви сударања двије океанске коре приликом чега настају ровови. На тај начин је настао и Маријански ров који представља најдубљу тачку на Земљиној чврстој површини [5]. Сеизмичка активност се најчешће јавља у зони подвлачења једне плоче под другу, при чему је угао нагиба од 20 до 55 степени. Оваква зона субдукције се назива Wadati-Benioff зона.

Дивергентне границе представљају процес раздвајања плоча приликом чега се формирају расједи. Овај процес се такође јавља и на океанском дну, гдје се у простор између плоча утискује магма из Земљиног омотача.

Трећи вид кретања плоча представља клизање плоча једне поред друге што дефинише *трансформни тип граница*. Овим процесом је креиран расјед Сан Андреас на западу САД-а.

Према ауторима [3], наведене врсте граница плоча се могу дефинисати и као: конструктивне, деструктивне и конзервативне.

У складу с тим, приликом дивергенције двије плоче на ослобођеном простору формира се нова литосферна плоча па се због тога овакве границе сматрају конструктивним.

Процесом конвергенције, долази до субдукције, односно подвлачења једне плоче под другу, што обично доводи до земљотреса. Према томе, овакве границе се називају деструктивне.

Поред тога, процес трансформног кретања плоча не доводи ни до стварања нове литосфере нити до уништавања, тако да су овакве границе конзервативне.

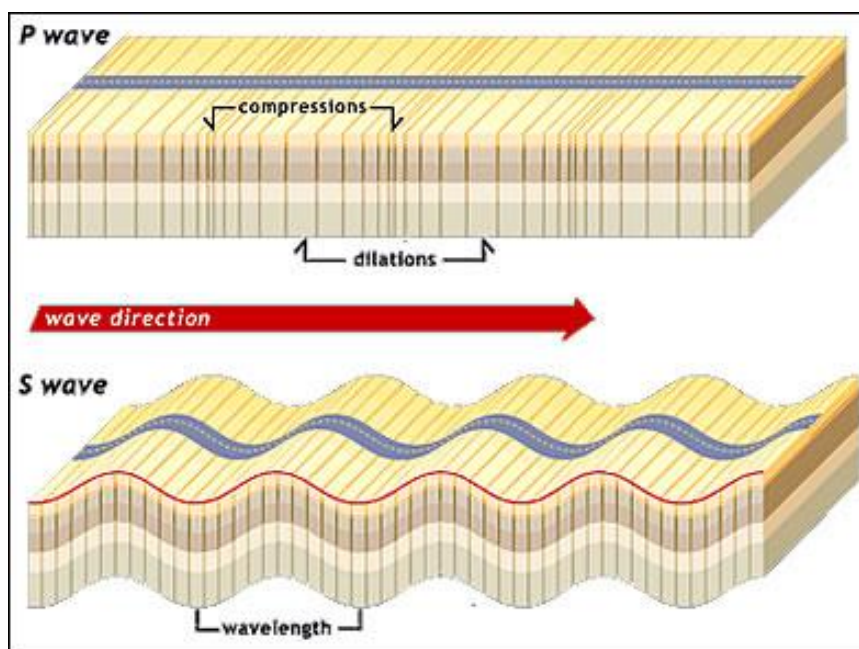
2.2. Сеизмологија

Сеизмологија проучава процесе који узрокују појаву земљотреса, кретања генерисаних сеизмичких таласа кроз Земљину кору и њену унутрашњост, као и деструктивне ефекте дејства сеизмичких таласа на вјештачким објектима на површи Земље. Настанак тектонских земљотреса је узрокован кретањем тектонских плоча. Њихово кретање доводи до стварања напона у стијенама дуж линије сучељавања плоча. Сучељавање плоча доводи до трансформације њихове кинетичке енергије у механичку, која се преко притиска концентрише у стијенама зоне сучељавања, све

док се не достигне максимум механичке чврстоће стијене и појаве њеног механичког лома, расједа и дислоцирања стијенске масе дуж расједне равни [8].

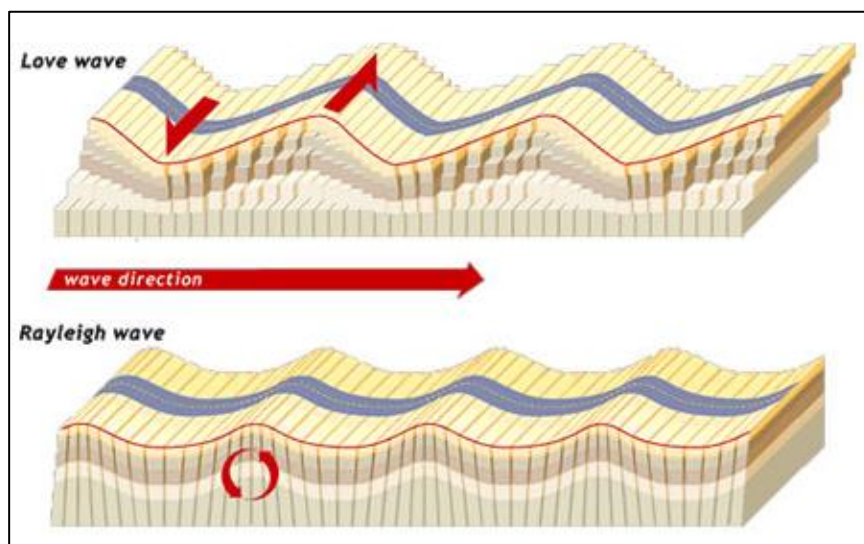
На питање шта је земљотрес заправо није лако одговорити. Односно, веома је тешко моделовати физички процес који се дешава током земљотреса на неки реалистичан начин. Током земљотреса, накупљени стрес у одређеном региону доводи до ломљења погођене стијене и ослобођења велике количине енергије у облику сеизмичких таласа који путују кроз Земљу. Мања количина енергије се ослобађа у виду акустичне енергије која се манифестује као тутњава која се чује током земљотреса [5].

Сеизмички таласи преносе ослобођену енергију приликом земљотреса, и могу се подијелити на површинске и дубинске. Када дође до земљотреса, ослобођена енергија се преноси у свим правцима. У зависности од брзине просторања, настају двије врсте дубинских таласа, примарни и секундарни (слика 4). Примарни таласи представљају најбрже таласе, чија се енергија преноси почетном компресијом честица која се затим преноси на сусједне честице. Секундарни таласи преносе енергију кретањем честица „горе-доље“ окомито на правац простирања [9].



Слика 4. Примарни и секундарни таласи [10]

Површински таласи, за разлику од дубинских, простиру се само дуж површине Земље и појављују се након P и S таласа те узрокују највеће површинско разарање. Они се могу подијелити на Love и Rayleigh таласе (слика 5). Код Love таласа честице се крећу трансверзално у односу на смјер ширења, али без вертикалног кретања, док код Rayleigh таласа кретање честица је кружно и ретроградно, при чему је ограничено на вертикалну раван у правцу простирања [10].



Слика 5. Love и Rayleigh таласи [10]

Земљотреси су једна од најопаснијих природних катастрофа која односи велики број људских живота сваке године широм Свијета. Поред тога, велики број људи страда и од догађаја који су изазвани земљотресима као што су цунамији [5].

Иако постоје напори да се дође до поузданог предвиђања земљотреса, то још увијек није сасвим поуздано могуће. Да би се то постигло неопходно је потпуно свхатити физику и механизам који се крију иза земљотреса. Међутим, да би се ово успјело, требало би да се знају својства материје и распојелу напона на великим дубинама. Наведене карактеристике су у функцији локалних геолошких услова што отежава примјену истог модела на више подручја [5].

Међутим, први корак ка овом циљу је прецизно осматрање дешавања током земљотреса да би се добијене информације искористиле за геофизичке моделе. Геодезија примјењује бројне методе за потребе осматрања земљотреса и њихових ефеката. Анализирањем координатних разлика помоћу GNSS метода за одређене станице долази се до информација о деформацијама на површи Земље. Уколико се опажања станица врше током дужег времена, може се доћи до закључака о процесима прије, током и након земљотреса. Често се дешава да покрет почиње данима и седмицама прије самог земљотреса. Такође, након јаких земљотреса, лагана помјерања се могу опажати мјесецима, што доводи до наставка деформације погођене области, а често и до враћања у првобитно стање. Уколико је мрежа GNSS станица густо распоређена у околини земљотреса, на основу мјерења густе временске резолуције може се доћи до података о ширењу и самом току земљотреса. Међутим недостатак GNSS методе је што она пружа податке само за тачке на којима се налазе пријемници. Због тога је корисно примјењивати и друге геодетске технике

као на примјер радарска снимања. Поређењем снимака прије и после земљотреса, могу се реконструисати површинске промјене [5].

Мана свих наведених метода је та што се углавном могу открити само површинске промјене, док се деструктивни процеси одвијају у унутрашњости Земље. За добијање основних информација о Земљиној унутрашњости корисно је мјерење гравитационог поља, које је директно осјетљиво на помјерање масе у дубинама Земље [5].

Према томе, да би се адекватно разумио, моделовао и на крају предвидио процес земљотреса, неопходно је комбиновати различите технике мјерења како би се искористиле њихове предности и конзистентно извршила интеграција њихових мјерења у физички модел процеса [5].

Природни земљотреси се могу подијелити према узроку настанка на [8]:

- Тектонске,
- Урвинске, и
- Вулканске.

Од претходно набројаних најдоминантнији су тектонски земљотреси. Ова група земљотреса настаје изненадним ломом стијенске масе услед великих притисака у стијенама, који се дуже вријеме акумулирају у околини жаришта земљотреса.

Теорија тектонских плоча описује следеће врсте сеизмичких зона [8]:

- Сеизмичке зоне дуж система рифтова,
- Сеизмичке зоне дуж трансформисаних подручја,
- Сеизмичке зоне дуж зона субдукције, и
- Сеизмичке зоне изазване тектонским сударима.

Први тип сеизмичких зона карактеристичан је за средњоокеанске рифтове код којих је сеизмичка активност генерално ниска и дешава се на малим дубинама јер је литосфера веома танка на овим дивергентним граничним зонама.

Други тип сеизмичких зона повезан је са трансформним граничним зонама као на пријеру расјед Сан Андреас. Код ових земљотреса клизање блокова се појављује у сегментима и не јављају се увијек дуж цијеле границе расједа у процесу земљотреса.

Трећи тип земљотреса је карактеристичан за субдукционе зоне које се јављају дуж конвергентних граничних подручја. Током овог процеса, једна плоча се подвлачи под другу приликом чега настаје океански ров. Земљотреси који се јављају у зонама субдукције могу бити на различитим дубинама.

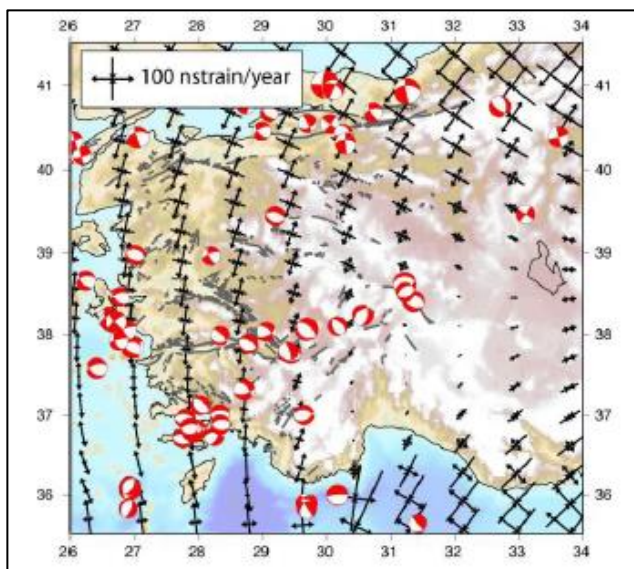
Четврти тип земљотреса је повезан са колизијом тектонских плоча, гдје је појава земљотреса последица формирања високих планинских вијенаца.

2.2.1. Могућности анализе временских серија GNSS координата за предвиђање сеизмичких активности

Временске серије GNSS координата омогућавају квантитативни опис кретања Земљине површине. Иако обезбјеђују тродимензионална помјерања, вертикална компонента је мање прецизности у односу на хоризонталну. Издавањем геофизичких сигнала из временских серија GNSS координата долази се до јасних увида у облике деформације Земље. У комбинацији са сеизмолошким подацима, временске серије GNSS координата се употребљавају за израду алгоритама за моделовање земљотреса. Да би се схватила динамика која узрокује деформације најважнији су интерсеизмички модели површинске деформације и анализе сеизмичких опасности [11], [12], [13].

Приликом анализе површинских деформација, укључивање времена у моделовање саме површинске деформације је од велике важности. Информације о временским варијацијама поља градијента брзине и поља деформација (слика 6) од великог су значаја за анализу сеизмичке опасности.

Деформација односно напрезање представља однос промјене узроковане деформацијом релативно у односу на оригиналну вриједност тог параметра. То је бездимензионална величина, иако се често користи $nstrain$ ($10^{-9} = 1 \text{ mm по } 1000 \text{ km}$). Први извод напрезања тачке по времену представља брзину напрезања која се изражава у јединицама $1/s$ или $nstrain/god$.



Слика 6. Поље деформације и брзине деформације [11], [14]

Континуирана GNSS мјерења омогућавају анализу грешака која представља значајан сегмент код успостављања везе између резултата анализе временских серија GNSS координата и сеизмичких активности. За ову потребу развијена су два модела. Први модел се назива GNSS сеизмологија и заснива на употреби континуираних GNSS пријемника и директном мјерењу динамичких помјерања [11], [15], [16]. Други модел се назива Геодезија земљотреса и користи изведена косеизмичка помјерања, при чему су магнитуде земљотреса и извор земљотреса инваријантне величине [11], [17], [18].

GNSS мјерења у реалном времену омогућавају детектовање почетка великих земљотреса, локализовање њихових хипоцентара и приближно моделовање догађаја у времену неколико минута након почетка руптуре земљотреса [11], [19]. На онову модела пролазних и сталних помјерања GNSS станица која су изазвана великим земљотресима, врши се одређивање извора земљотреса у реалном времену.

Предложена је интеграција забиљежених GNSS помјерања са постављеним сеизмометрима снажног кретања (убрзања) [20]. Записи акцелерометра морају бити интегрисани два пута да би се добио помјерај, и морају се кориговати за било који нагиб инструмента проузрокован помјерањима земљотреса (статичког или динамичког). Уз то, осмишљен је метод за комбиновање два тока података употребом Калман филтера и показано је да се могу обновити широкопојасни покрети тла са великом вјеродостојношћу. Континуиране GNSS станице опремљене акцелерометрима обезбјеђују побољшане податке за брзо одређивање магнитуде земљотреса и потенцијално рано упозорење на земљотрес.

2.2.2. Упозорење на земљотрес у реалном времену

Чињеница да далека помјерања изазвана земљотресима могу бити веома велика у поређењу са прецизношћу и тачношћу кинематичких GNSS рјешења у реалном времену, подстиче напоре за развој примјене GNSS-а у реалном времену за рано упозорење на земљотресе [20].

GNSS помјерања у реалном времену могу дати процјене магнитуде земљотреса и димензије руптуре које су веома комплементарне сеизмолошким информацијама у реалном времену.

Међутим, постоји неколико потенцијалних ограничења за примјену GNSS у реалном времену за рано упозорење на земљотрес, као што су вријеме и магнитуда сигнала дформације.

Помјерање GNSS сајтова се детектује када сеизмички дубински таласи стигну до локације, а не у тренутку када земљотрес почиње. На основу тога се може закључити да само GNSS станице које су веома близу руптуре расједа могу допринијети раном упозорењу на земљотрес, које има за циљ да упозори на подрхтавање тла прије него што оно стигне. Поред тога, станице морају бити довољно близу извора земљотреса да би се регистровала значајна помјерања земљотреса с обзиром на ниво буке.

Коришћење GNSS временских серија у реалном времену за упозорење на земљотрес, захтијева аутоматизоване методе за детекцију и мјерења помјерања изазваних земљотресом, као и за инверзију ових података за параметре извора земљотреса. Детаљи ових метода зависе од тога да ли ће сеизмолошке информације бити доступне или не. Брзо откривање земљотреса коришћењем само сеизмичких мрежа једноставније је у односу на геодетске. Међутим, постоји неколико приступа у откривању проблема коришћења само GNSS података. Да би се извршила процедура инверзије у реалном времену, предложена је употреба помјерања временске серије за процјену апроксимације тачкастог извора земљотреса. Постоје три различита приступа у рјешавању овог проблема којима је заједничко да се поуздана рјешења могу добити у року од неколико минута с обзиром на тачан скуп статистичких помјерања [20].

2.3. Геодетске технике мјерења за геодинамичка истраживања

Геодезија се бави континуираним мјерењем временски промјенљиве геометрије Земљине површи, Земљиног гравитационог поља, и њене ротације и оријентације у простору. Данас је могуће мјерити помјерања и брзине тектонских плоча примјеном геодетских техника.

Почетак примјене сателитских техника био је седамдесетих година двадесетог вијека уз помоћ Satellite-Laser-Radar (SLR) и Very-Long-Baseline-Interferometry (VLBI) технологије [4].

SLR представља методу ласерског одређивања растојања до сателита тако што се дужина двосмјерно одређује. Сигнал се након емитовања са станица одбија од рефлектора на сателиту, а потом региструје на станици. Мјерење времена које је потребно да сигнал стигне од станице до сателита и назад се врши помоћу једног часовника који је саставни дио опреме на станици [21].

VLBI метода користи емитоване микроталасне сигнале екстрагалактичких радио извора – квазара, уз помоћ радио телескопа који се налази на растојањима од

неколико хиљада километара при чему се мјери разлика у времену путовања сигнала.

С обзиром да су рачунски алати за геодинамичка истраживања постојали прије развоја сателитских техника мјерења, једино је било неопходно обезбједити мјерења деформације површи Земље са густом просторном и временском резолуцијом. То је управо постигнуто развојем Глобалног позиционог система који представља први потпуно оперативни Глобални навигациони сателитски систем.

Данас се за геодинамичка истраживања масовно користи GNSS технологија која обезбјеђује временске серије милиметарске прецизности. Тренутне студије геодетске тектонике се базирају на помјерањима или брзинама добијеним из временских серија позиција станица изражених у Међународном терестричком референтном систему (ITRF).

Геодинамичка истраживања, заснована на примјени GNSS технологије, могу се подијелити на сљедеће категорије [20]:

- Кретање крутих плоча,
- Деформације границе плоча,
- Земљотресе и сеизмологију,
- Вулканске деформације, и
- Деформације површинског оптерећења укључујући глацијално изостатичко прилагођавање.

Захтјеви GNSS тачности за геодинамичка истраживања зависе од очекиване величине помјерања или брзине кретања. Побољшањем прецизности GNSS мјерења повећали су се и типови геодинамичких проблема којима су се људи бавили. Данашња истраживања се баве милиметарским помјерањима или брзинама од милиметар годишње што није било могуће истраживати на почетку GNSS ере. Очекује се да ће повећање тачности GNSS мјерења довести до проширења проучавања геодинамичких појава.

Анализа континуираних GNSS станица на десетинама или стотинама метара једних од других, коришћењем рјешења базних линија, показала је да се релативне брзине између двије GNSS антене могу мјерити са прецизношћу од 1 mm/год, потенцијално 0.1 mm/год [20]. Гранична тачност потенцијалне брзине на већим размјерама и апсолутна тачност брзине зависи од два фактора: тачности и дугорочне стабилности ITRF-а, и грешака у приступу ITRF-у (грешка претварања рјешења у ITRF). Тачност геодинамичких истраживања користећи GNSS је условљена

тачношћу и конзистентношћу ITRF-а и степеном којим ITRF представља стварни геоцентрични оквир.

2.4. Развој GNSS мрежа за геодинамику

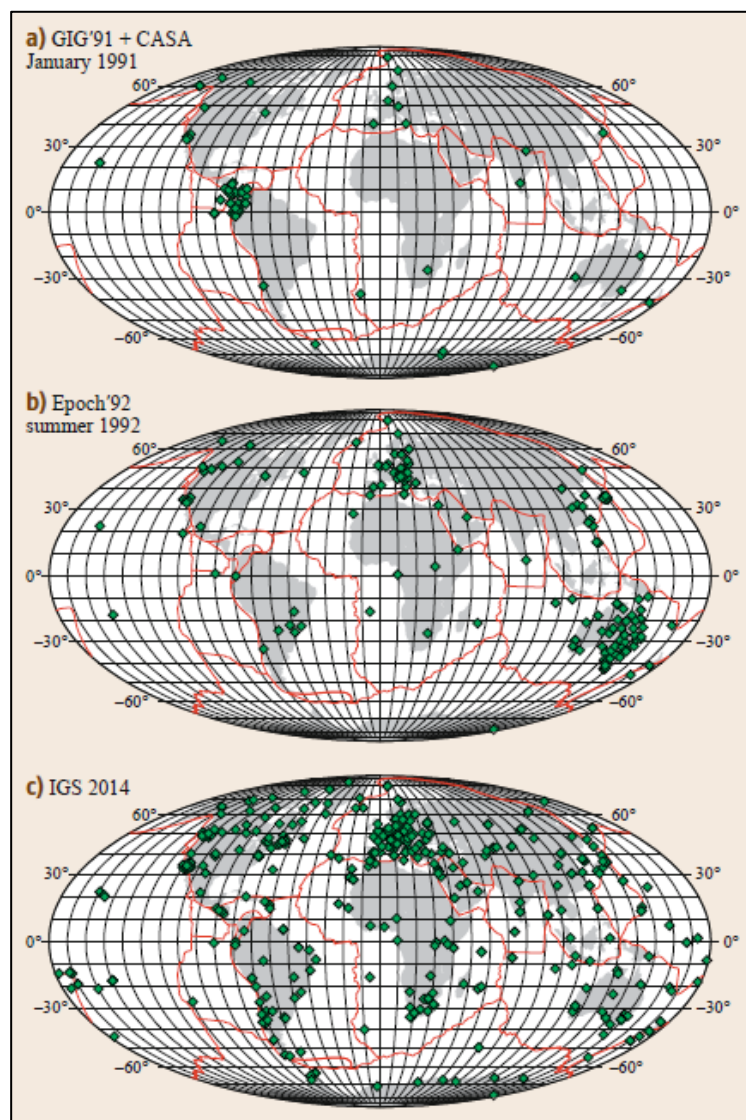
GNSS мреже означавају скуп геодетских тачака које се периодично мјере примјеном GNSS инструмената.

GPS кампање које су обухватиле већи дио Европе, организоване су почевши од 1989. године под EUREF (енгл. Reference Frame Sub-Commission for Europe) пројектом за комбинацију геодетских и геодинамичких циљева.

Мреже кампања се односе на мреже геодетских тачака које се мјере периодично употребом GNSS инструмената. Иако неке мреже кампање покривају велике површине, већина настоји да буде просторно густо распоређена у укупном обиму, са 10-100 мјерених тачака које су међусобно удаљене од километар до десетине километара [20].

Осамдесетих и деведесетих година двадесетог вијека било је уобичајено да се свака локација посједне пет или више узастопних дана. Побољшањем тачности, број дана се смањивао на два до три, или понекад само један. Поновљена мјерења за такве мреже се обично врше једном годишње или једном у неколико година.

Прве регионалне континуиране GNSS мреже за геодинамику развијане су од 1990. године. Мала континуирана GNSS мрежа са размаком од око 1000 km успостављена је у Јапану. Овакве мреже су развијане примарно за мјерење деформација везаних за тектонске процесе. Ове ране мреже су успјешно демонстрирале могућност и корисност мјерења деформација на дневној бази. Ток развоја континуираних GNSS мрежа приказан је на слици 7.



Слика 7. Ток развоја континуираних GNSS мрежа [20]

Земљотрес Landers у Калифорнији 30.6.1992. године је показао моћ континуираних опажања. Помјерања изазвана земљотресом су одређена из континуираних података у року од неколико дана након земљотреса.

Два разарајућа земљотреса 1994. и 1995. године подстакли су ширење континуираних GNSS мрежа за геодинамичка истраживања.

Northridge земљотрес 17.01.1994. магнитуде 6.7 погодио је Лос Анђелес и током њега је страдало 57 људи. Поред тога, било је преко 5000 повријеђених и причињена је огромна материјална штета. Земљотрес је подстакао развој PGGA (енгл. Permanent GPS Geodynamic Array) са 57 станица у року од двије године од земљотреса и касније додатних 250 станица у склопу SCIGN (енгл. Southern California Integrated GPS Network) мреже.

Годину дана након овог земљотреса, Kobe земљотрес погодио је Јапан. Земљотрес магнитуде 7.3 усмртио је преко 6000 људи и проузроковао материјалну

штету од приближно 100 милијарди долара. Ово је подстакло Владу Јапана на развој 1000 станица GEONET (енгл. GPS Earth Observation Network System) мреже широм цијеле земље. Данас постоји 1200 GEONET станица у Јапану којима руководи Управа Јапана за геопросторне информације GSI (енгл. Geospatial Information authority of Japan), плус неколико стотина GNSS станица којима управљају универзитети или друге агенције. GEONET је био ревоуционаран по томе што је први пут предвиђао густе континуиране GNSS податке који обухватају читаву границу плоче. GEONET подаци су открили не само стабилно напрезање унутар границе плоча, већ и широк спектар пролазних деформација усљед површинског оптерећења и деформације усљед великог броја земљотреса, укључујући велики земљотрес магнитуде 9.0 који се догодио 2011. године у источном Јапану.

3. ГЛОБАЛНИ НАВИГАЦИОНИ САТЕЛИТСКИ СИСТЕМИ

Глобални навигациони сателитски систем (GNSS) је општи термин који описује било коју сателитску констелацију која пружа услуге позиционирања, навигације и мјерења времена на глобалном или регионалном нивоу [22]. Сателити обезбјеђују сигнале са подацима на основу којих пријемници одређују локацију.

Термин GPS се данас често користи као синоним за све GNSS системе. Разлог томе је заправо то што је GPS први потпуно оперативни систем који је поставио стандарде у области сателитског позиционирања, навигације и трансфера времена. Међутим, GPS представља систем развијен од стране америчке војске, и означава глобални позициони систем.

Поред GPS, данас постоје и други глобални навигациони сателитски системи, као што су руски GLONASS (рус. Глобальная Навигационная Спутниковая Система), кинески BeiDou и европски Galileo. Према томе, GNSS је заједнички термин који се треба користити за све претходно наведене глобалне навигационе сателитске системе. Карактеристике наведених GNSS система су приказане у табели 1.

Табела 1. Карактеристике GNSS система [5]

Систем	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou-3
Оператор	САД	Русија	Европа	Кина
Висина орбите	20.200 km	19.200 km	23.200 km	21.500 km
Број орбиталних равни	6	3	3	3
Инклинација орбите	55°	65°	56°	55°
Номиналан број сателита	24	24	30	24

Такође, постоје и два регионална сателитска система, а то су јапански QZSS (енгл. Quasi-Zenith Satellite System) и индијски IRNSS/NavIC (енгл. Indian Regional Navigation Satellite System/Navigation with Indian Constellation).

Заједничко за све GNSS системе је то што су компатибилни и интероперабилни. Компатибилност се заснива на томе што се ови системи могу користити заједно или одвојено, а да при томе не дође до интерференције сигнала. Са друге стране, интероперабилност представља могућност њиховог заједничког коришћења да би се повећале преформансе на корисничком нивоу. Поред наведених карактеристика, заједничко за ове системе је и то да су једносмјерни и пасивни. Једносмјерни су из разлога што се заснивају на мјерењу дужина или промјена

дужина емитовањем сигнала са Земље према сателитима или обрнуто. Пасивност се огледа у томе што корисници немају могућност комуникације са сателитима већ само примају сигнале. Све претходно наведено омогућава да ови сателитски системи могу опслуживати неограничен број корисника [21].

3.1. Основни концепт GNSS позиционирања

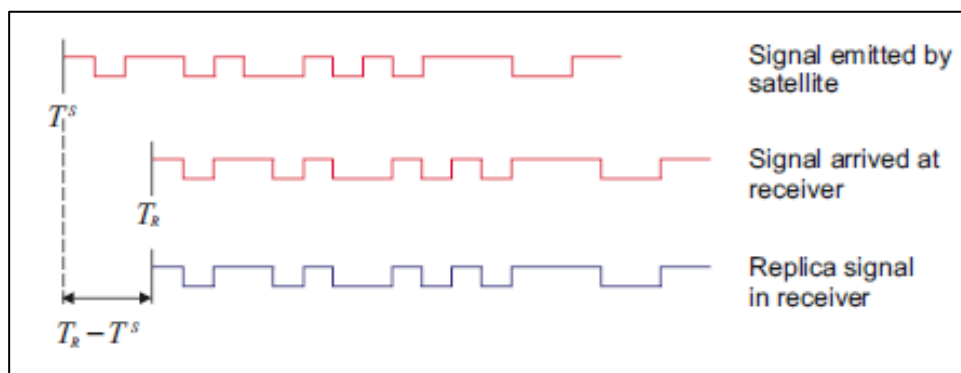
GNSS сигнали представљају електромагнетне таласе који се шире брзином свјетлости. GNSS објезбјеђује сигнале на најмање двије различите фреквенције како би се компензовало јоносферско кашњење у мјерењима. Фреквенције сигнала се крећу у опсегу између 1.2 и 1.6 GHz, познатом као L-опсег, при чему су таласне дужине у распону 19-25 cm [20].

Специфично за све GNSS сигнале је модулација хармонијског радио таласа са карактеристичним псеудослучајним кодом PRN (енгл. Pseudo Random Noise) који представља случајни низ нула и јединица. Ови кодови олакшавају мјерење времена простирања сигнала [20].

Сви GPS, Galileo и BeiDou сателити емитују PRN код на истој фреквенцији, што омогућава пријемнику да идентификује сателит. За разлику од њих, GLONASS сателити емитују исти код, али на различитим фреквенцијама [5].

Такође, сигнал је модулисан навигационом подацима који садрже информације о орбити предајника сателита и помјерању његовог локалног сата у односу на GNSS системско вријеме [20].

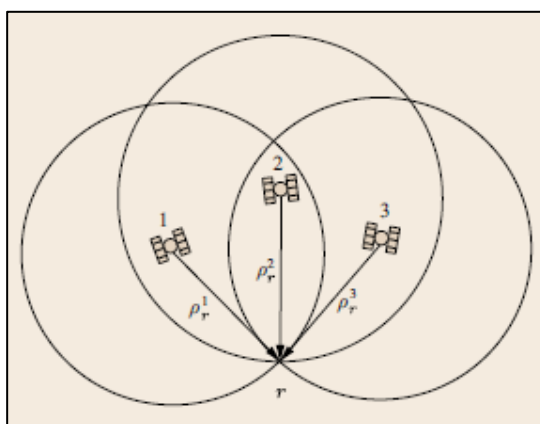
Да би одредио вријеме простирања сигнала, пријемник генерише реплику сигнала сателита. Након тога врши поређење овог сигнала са сигналимa сателита који су видљиви. Пријемник помјера реплику сигнала да би извршио корелацију са сигналимa у антени. Уколико пронађе подударање, примјењени помак одговара разлици времена пријема T_R , које је мјерено часовником пријемника, и времена емитовања сигнала T^S , мјереног сателитским часовником. Измјерена разлика између ова два времена $T_R - T^S$, помножена брзином свјетлости у вакууму представља такозвану псеудодужину [5]. Претходно описани поступак приказан је на слици 8.



Слика 8. Принцип мјерења времена простирања сигнала [5]

Као што је претходно објашњено, мјерење дужина се заснива на мјерењу времена простирања електромагнетних сигнала од сателита до пријемника. Да би се одредила позиција пријемника неопходно је извршити мјерења према више сателита. Позиционирање се врши поступком трилатерације, односно просторног лучног пресјека.

На основу мјерења до једног сателита може се закључити да је позиција станице негдје на сфери чији је центар сателит, а полупречник једнак измјереној дужини. Мјерењем дужине истовремено и према другом сателиту добијамо нову сферу за коју важи претходно наведено. Такође, пресјек ове двије сфере даје круг којем припада и тачка позиције пријемника. Трећа истовремено измјерена дужина дефинише трећу сферу, која претходне двије сфере сијече у тачно двије тачке. Једна од ове двије тачке се може одмах одбацити јер се налази далеко у свемиру, према томе преостала тачка представља позицију пријемника. У складу са тим неопходно је извршити минимално три мјерења да би се одредила позиција пријемника као што је приказано на слици 9.



Слика 9. Трилатерациона метода позиционирања [20]

Да би се адекватно измјерило вријеме пута радио сигнала, часовници у сателитима и пријемнику морају бити синхронизовани са високом тачношћу. Међутим, с обзиром да се због економичности у пријемницима уграђују кварцни

осцилатори који су мање тачности у односу на атомске часовнике сателита, сви временски интервали ће бити оптерећени грешком систематског карактера. Ово доводи до тога да ће сва измјерена растојања бити подједнако дужа или подједнако краћа од истините вриједности, због чега се измјерена растојања називају псеудодужине [21].

На основу наведеног, за потпуно одређивање тродимензионалне позиције пријемника неопходне су најмање четири псеудодужине како би се оцјенила и грешка синхронизације часовника пријемника и сателита. У складу с тим математички модел GNSS трилатерације своди се на рјешавање система једначина:

$$\rho_r^i = \sqrt{(x_r - x^i)^2 + (y_r - y^i)^2 + (z_r - z^i)^2} + b \quad (1)$$

по непознатим координатама (x_r, y_r, z_r) станице и непознатој грешци синхронизације часовника b , док су координате сателита познате и означене индексом $i = 1, 2, 3, 4$.

3.2. Типови GNSS позиционирања

Постоје различити типови GNSS позиционирања који се међусобно разликују у погледу сложености и прецизности.

Аутономно или апсолутно позиционирање представља позиционирање корисника са једним пријемником у реалном времену без икакве помоћне инфраструктуре. Ипак, апсолутно позиционирање не мора бити у реалном времену, тако да корисник може вршити накнадну обраду изведених мјерења како би одредио положај. У случају да је број измјерених псеудодужина већи од четири, тада се до рјешења долази примјеном статистичког поступка оцјењивања непознатих параметара који се назива метод најмањих квадрата. Стандардно одступање хоризонталног положаја одређеног апсолутним позиционирање износи неколико метара, док је тачност висина обично дупло лошија [21].

Прецизно апсолутно позиционирање PPP (енгл. Precise Point Positioning) представља позиционирање једним пријемником, приликом којег се умјесто података навигационе поруке користе инфромације у виду IGS (енгл. International GNSS Service) или JPL (енгл. Jet Propulsion Laboratory) прецизних ефемерида и стања часовника. Такође, ова врста позиционирања подразумијева коришћење двофрекветних мјерења, тако да се њиховом комбинацијом елиминише утицај јоносферске рефракције. Пошто се ради о високој прецизности одређени извори грешака се морају моделовати, као што су: плина Земљине коре, океанско

оптерећење Земљине коре, атмосферско оптерећење Земљине коре и ефекат фазног увијања. Приликом оцјењивања непознатих параметара у моделима прецизног апсолутног позиционирања најчешће се користи нека врста секвенцијалног филтера који је у стању да се адаптира варијабилној динамици као што је Калманов филтер. Тачност ове врсте позиционирања је у функцији режима рада и дужине времена опажања, поред тога значајну улогу има и квалитет прецизних сателитских орбита као и података о стању сателитских часовника. Приликом опажања од преко 30 минута у статичком режиму рада могуће је постићи тачност од неколико центиметара, док приликом кинематичког позиционирања та вриједност износи пар дециметара [21].

Диференцијално позиционирање подразумева симултана мјерења два релативно блиска пријемника приликом чега су грешке мјерења по знаку и интензитету доста сличне. Уз то ако је пријемник постављен на познату локацију, укупна грешка мјерења се лако оцјењује тако што се упореди измјерена псеудодужина и растојање срачунато на основу координата станице и сателита. Према томе, пријемник који је постављен на станицу са познатим координатама за сваку епоху опажања оцјењује грешке измјерених псеудодужина које се називају диференцијалне корекције и емитује их радио антенном у околни простор. Корисник у близини референтне станице који врши истовремено мјерења до истих сателита прихвата диференцијалне корекције и примјењује их на своја мјерења. На овај начин елиминише грешку часовника сателита. Тачност ове методе у великој мјери зависи од удаљености од референтне станице и од старости и кашњења корекција. Уколико се диференцијално позиционирање примјени на фазне псеудодужине при чему растојање до референтне станице не прелази 20 – 30 km, могуће је постићи тачност бољу од 10 cm [21].

Релативно позиционирање, за разлику од диференцијалног, умјесто емитовања корекција подразумева да референтна станица емитује оригинална опажања. Кориснички пријемник комбинује сопствене псеудодужине са примљеним и на тај начин поништава у великој мјери грешку ефемерида, тропосферске и јоносферске рефракције. Овим позиционирањем се одређује релативан положај корисника у односу на референтну станицу. Потом се једноставним додавањем координатних разлика на познате координате референтне станице одређује положај корисника. Релативно позиционирање се може подијелити у два основна режима рада [21]:

- Кинематичко позиционирање – позиционирање покретног корисника у реалном времену. У случају употребе кодних псеудодужина остварује се

тачност релативних положаја од неколико дециметара. RTK (енгл. Real-Time Kinematic) позиционирање подразумијева примјену фазних псеудодужина под претпоставком да су ријешене фазне неодређености приликом чега се постиже тачност испод дециметра. Фазне неодређености се рјешавају поступком иницијализације.

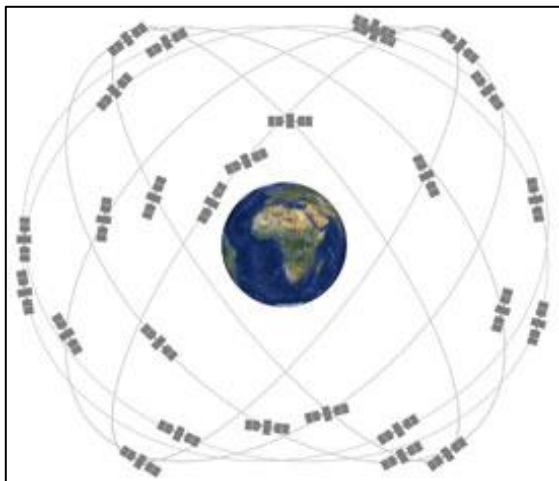
- Статичко позиционирање – позиционирање стационарног корисника у односу на референтну станицу. С обзиром да резултати нису потребни у реалном времену, није потребна комуникациона веза корисника са референтном станицом. До релативног положаја тачака се долази накнадном обрадом мјерења. Ова врста позиционирања обезбјеђује милиметарску тачност релативних положаја.

3.3. Подјела GNSS система

3.3.1. Глобални позициони систем GPS

Глобални позициони систем је амерички GNSS који омогућава позиционирање, навигацију и мјерење времена широм Земље. Првобитно је развијен за војне потребе тако да су за његову цивилну употребу од самог почетка постојала одређена ограничења. Према томе GPS пружа двије услуге позицинирања: стандардно позиционирање за цивилну употребу SPS (енгл. Standard Positioning Service) и прецизно позиционирање за војну примјену PPS (енгл. Precise Positioning Service).

Лансирање првог Block I Navstar GPS сателита извршено је 22. фебруара 1978. Почетна оперативност је постигнута децембра 1993. године са 24 оперативна сателита, док је потпуна оперативност постигнута у јуну 1995. Лансирање посљедње генерације сателита GPS III/IIIF започето је 2018. године. Констелација GPS сателита је приказана на слици 10.



Слика 10. Констелација GPS сателита [22]

У четвртом поглављу ће бити више ријечи о GPS систему, са нагласком на архитектуру система, структуру сигнала које систем користи, грешке које се јављају током мјерења, а поред тога, биће дефинисан и математички модел GPS мјерења.

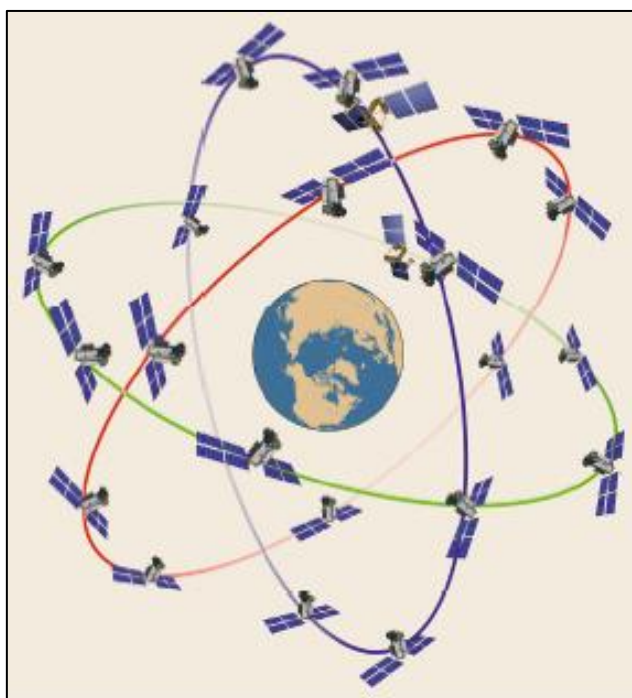
3.3.2. Глобални навигациони сателитски систем GLONASS

GLONASS је руски глобални навигациони сателитски систем за одређивање положаја и брзине у реалном времену за војне и цивилне кориснике. Развијен је још у вријеме Совјетског Савеза. Први GLONASS сателит лансиран је 12. октобра 1982. године. Потпуна оперативност постигнута је почетком 1996. године са укупно 24 сателита. Распад Совјетског Савеза је утицао и на GLONASS систем након чега је Русија преузела све обавезе и надлежности над системом. Потпуна оперативност након распада СССР постигнута је тек 2011. године. Констелација GLONASS система (слика 11) је погодна за коришћење на великим географским ширинама гдје може бити проблем са пријемом GPS сигнала.

GLONASS сателити емитују два типа сигнала: сигнале стандардне прецизности L1OF/L2OF и високопрецизне сигнале L1SF/L2SF. Сви GLONASS сателити емитују исти псеудослучајни код али на различитим фреквенцијама.

GLONASS сателити су подијељени у три генерације [21]:

- Прва генерација GLONASS I/II (од 1982. године),
- Друга генерација GLONASS-M (од 2003. године), и
- Трећа генерација GLONASS-K (од 2011. године).



Слика 11. Констелација GLONASS сателита [20]

Контролни сегмент система смјештен је на територији бившег СССР са изузетком једне станице у Бразилу. GLONASS користи геоцентрични референтни систем PZ-90.

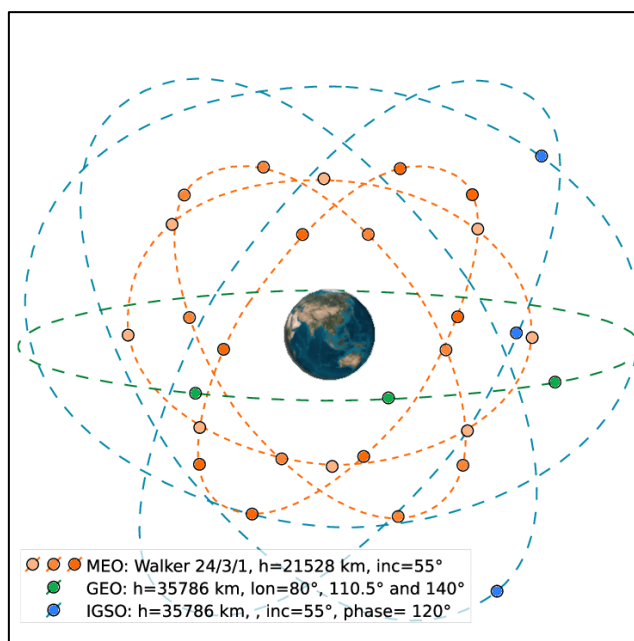
Системско GLONASS вријеме блиско је UTC временској скали, осим постојања константне разлике од 3^h између Москве и Гринича. Због везе са UTC временом користи преступне секунде [21].

3.3.3. BeiDou

BeiDou је сателитски навигациони систем у оквиру космичког програма Кине који је започет осамдесетих година двадесетог вијека. BeiDou-1 успостављен је 1994. године, а почетна констелација састојала се од укупно три сателита лансирана 2000. и 2003. године у геостационарним орбитама. Почетни регионални BeiDou-1 систем замијењен је глобалним навигационим сателитским системом BeiDou-2 који је познат и под називом COMPASS.

Планирана је констелација од 35 сателита, од којих 5 са геостационарним орбитама GEO (енгл. Geostationary Orbit), 27 са средњим висинама лета MEO (енгл. Medium-altitude Earth Orbit) и 3 у нагнутим геосинхроним орбитама IGSO (енгл. Inclined Geosynchronous Orbits) (слика 12).

BeiDou-2 као и претходни системи предвиђа слободно доступну цивилну службу и лиценцирану службу доступну Влади и војсци. Сигнали система заснивају се на псеудослучајним кодовима као и код GPS. Фреквенције које BeiDou-2 користи преклапају се са фреквенцијским опсезима предвиђеним за Galileo.



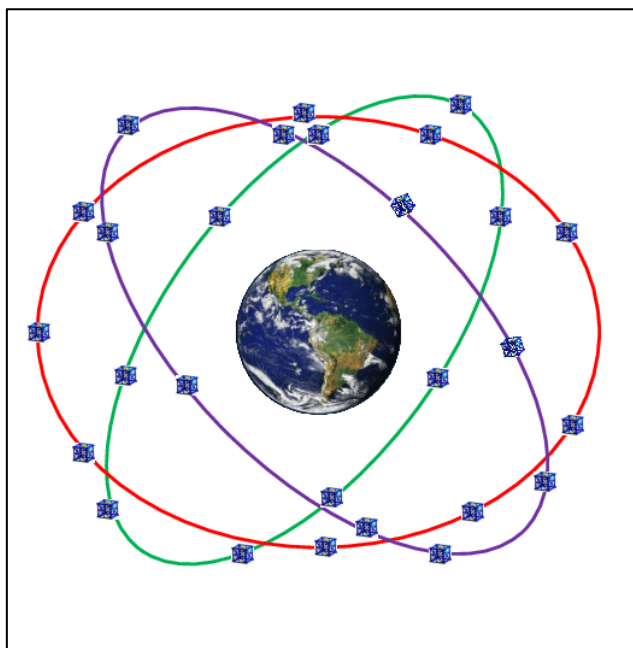
Слика 12. Констелација BeiDou сателита [23]

Децембра 2011. систем је пуштен у пробни рад на територији Кине и околних земаља, док од децембра 2012. године нуди услуге за азијско-пацифички регион. Трећа фаза развоја BeiDou система завршена је 2020. године којом је обезбјеђена глобална покривеност за навигацију и мјерење времена.

3.3.4. Galileo

Европска унија је донијела одлуку 1999. године о покретању сателитског навигационог програма под цивилном контролом. Према томе, Galileo је европски глобални навигациони сателитски систем који се састоји из три компоненте: глобалне (космички и контроли сегмент), регионалне и локалне.

Предвиђена је сателитска констелација од 27 оперативних и три резервна сателита (слика 13). Први Galileo сателит лансиран је децембра 2005. године под називом GIOVE-A (енгл. Galileo In-Orbit Validation Element).



Слика 13. Констелација Galileo сателита [24]

Galileo систем користи пет фреквенцијских опсега, при чему се два опсега намјерно подударају са GPS опсезима због интероперабилности.

Планирано је да Galileo пружа сљедеће услуге:

- Отворени, јавно доступни сервис OS (енгл. Open Service),
- Комерцијални сервис CS (енгл. Commercial Service),
- Сигурносни сервис SoL (енгл. Safety-of-Life Service),
- Сервис јавне управе PRS (енгл. Public Regulated Service), и
- Сервис претраживања и спасавања SAR (енгл. Search and Rescue Service).

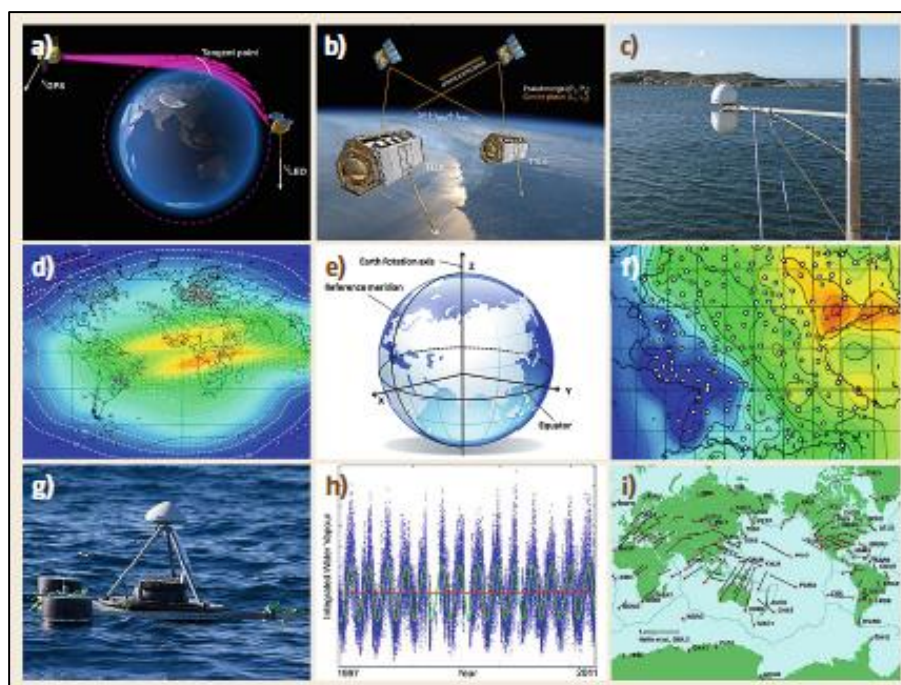
Референтни систем за Galileo се дефинише као гецентрични, а његова реализација са називом Galileo терестрички референтни оквир GTRF (енгл. Galileo Terrestrial Reference Frame) је блиска са међународним терестричким референтним оквиром (ITRF) на нивоу бољем од 3 cm.

Системско Galileo вријеме GST (енгл. Galileo System Time) је дефинисано као атомска временска скала која се од међународног атомског времена TAI (енгл. International Atomic Time) разликује за цијели број секунди.

Због различитих околности и потешкоћа реализација Galileo пројекта је каснила, па се очекује да потпуну оперативност постигне током 2023. године.

3.4. Примјена GNSS система

GNSS је данас широко распрострањен у разним сферама живота што доводи до великог броја различитих примјена. Највећи проценат примјене своди се на употребу унутар личних навигационих уређаја као и на навигацију саобраћајних возила. Високо прецизни GNSS уређаји се користе за примјену у рјешавању геодетских задатака и за потребе пољопривредне производње. Поред тога, GNSS се користи и за научна истраживања, међу којима се убрајају и тектонска помјерања (слика 14).



Слика 14. Примјена GNSS за научна истраживања [20]

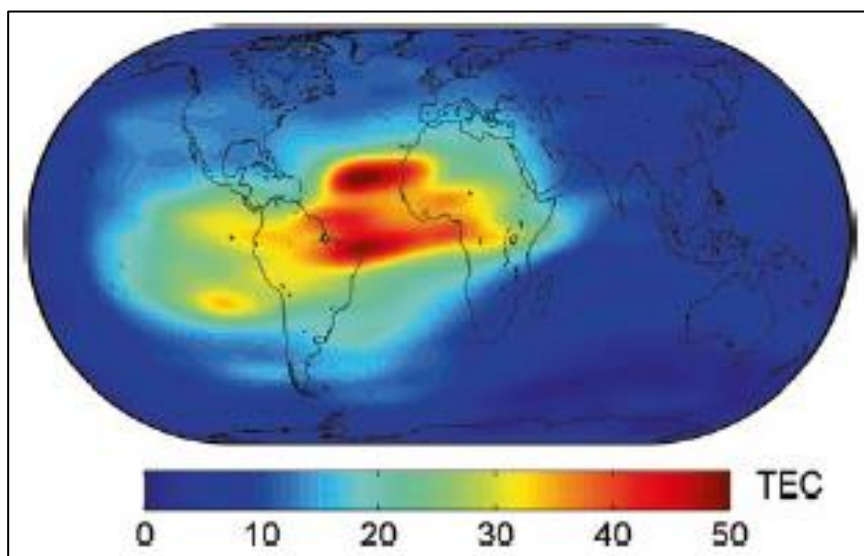
Посљедњих година се број области у којима се употребљава GNSS драстично повећао. GNSS се користи за изградњу жељезница, путева, као и за контролу грађевинских машина. Такође, GNSS се користи за праћење клизишта, мјерење деформација на границама литосферних плоча и деформација изазваних

земљотресима. На основу тога врши се моделовање геофизичких процеса, пружање упозорења на цунами, као и мјерење издизања земљишта које је последица отапања ледника [5].

Комбинацијом различитих техника геодетских мјерења VLBI, SLR и DORIS (енгл. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) са GNSS системом врши се реализација Међународног терестричког референтног оквира. Уз то GNSS има значајну улогу у реализацији међународног атомског времена (TAI).

Чињеница да су GNSS сигнали осјетљиви на водену пару у атмосферу доводи до тога да метеоролошке службе користе ову појаву за своје прогнозе времена. GNSS мјерења су посебно корисна за предвиђање обилнијих падавина. С обзиром да просјечно стање атмосфере на неком дијелу Земљине површине дефинише климу, GNSS алати се могу користити и у климатским истраживањима, са посебним нагласком на питање глобалног загријавања [5].

GNSS такође помаже и за разумијевање процеса који се одвијају у јоносфери. Ово је значајно из разлога што лоше вријеме у јоносфери може да наруши системе радио комуникације, навигације и електричног напајања. Такође, узимајући у обзир утицај земљотреса и цунамија на густину електрона у јоносфери, осјетљивост GNSS сигнала на јоносферу може постати значајна компонента у системима који се користе за упозорења на цунами [20]. Како на GNSS сигнале утиче њихов пролазак кроз јоносферу, на основу одговарајуће анализе примљених сигнала може се извршити мапирање количине садржаја електрона у јоносфери (слика 15). Густина електрона у јоносфери може се представити у јединици која се назива укупан садржај електрона TEC (енгл. Total Electron Content).



Слика 15. Карта густине електрона у јоносфери изражена у јединици TEC [5]

Поред свега наведеног, рефлексја сигнала се користи за праћење окружења GNSS станица. Ове станице се користе за одређивање плиме и осеке на обали, мјерењем нивоа мора у односу на обалу, на основу временске разлике путовања директног GNSS сигнала и сигнала рефлектованог од морску површину.

4. ГЛОБАЛНИ ПОЗИЦИОНИ СИСТЕМ

GPS је дио сателитског навигационог система који је развијен од стране Министарства одбране САД-а у оквиру сателитског програма NAVSTAR [25]. Развој програма започео је седамдесетих година двадесетог вијека, док је лансирање првог GPS сателита извршено 1978. године. Систем је постао потпуно оперативан 1995. године [20]. Првенствено, програм је развијен за потребе прецизног одређивања позиције, брзине и времена америчке војске, а настао је фузијом програма TIMATION и 621В. С обзиром на војне потребе, од система је захтијевана функционалност на покретним платформама, глобална покривеност, неограничен број корисника, а поред тога и отпорност на временске услове као и висок степен заштите од ометања и интерференције сигнала [21]. Све претходно наведено је дефинисало услове који морају бити обезбјеђени адекватним избором архитектуре система.

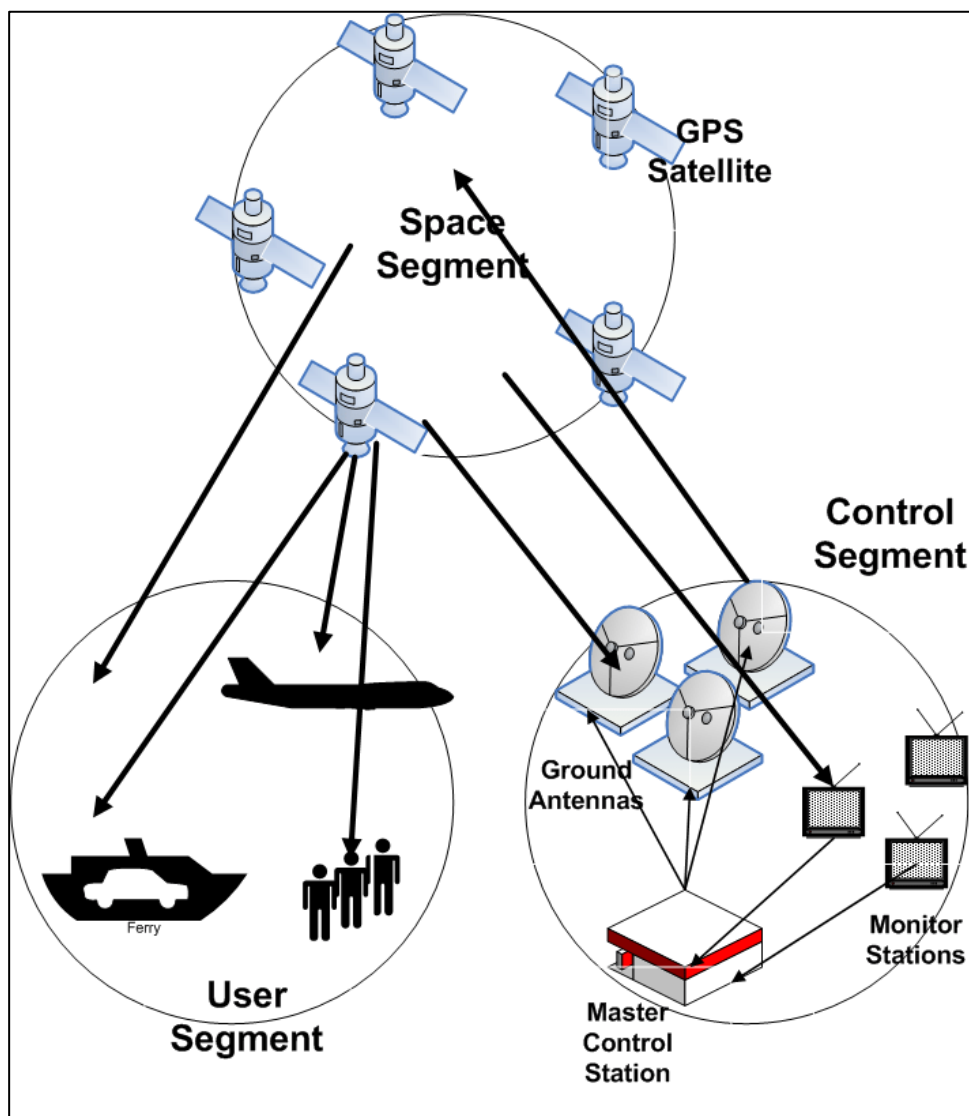
Као што је већ речено, од самог почетка су постојала одређена ограничења за цивилну употребу GPS система. Како би направила компромис, Влада САД је политиком дефинисала два режима употребе система: стандардно позиционирање за цивилну употребу (SPS) и прецизно позиционирање за војне потребе (PPS). Разграничење између цивилне и војне употребе је начињено емитовањем прецизних сигнала у шифрованом облику, које су могли користити само овлашћени PPS корисници.

4.1. Архитектура система

Архитектуру GPS система чине три компоненте (слика 16):

- Космичка компонента,
- Контролна компонента, и
- Корисничка компонента.

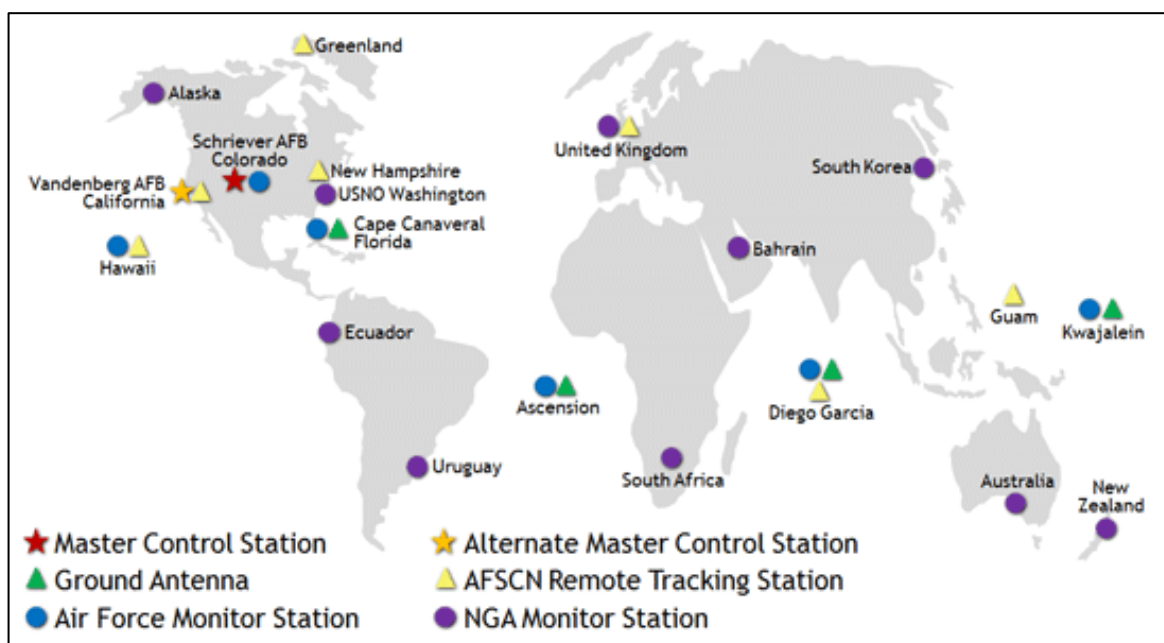
Космичка компонента се састоји од иницијалних 24 сателита распоређених у шест орбиталних равни полупречника 26 559 km [20]. Инклинација сателитских орбита у односу на екваторијалну раван износи 55°. Орбиталне равни су означене словима редом од А до F. Временом је извршена допуна броја оперативних сателита, тако да их је тренутно укупно 31. Распоредом сателита је обезбјеђена видљивост минимално четири сателита у сваком тренутку без обзира на локацију корисника.



Слика 16. Компоненте GPS система [26]

Контролна компонента обавља све задатке неопходне за адекватно управљање сателитским операцијама. Основу контролног сегмента чини главна контролна станица MCS (енгл. Master Control Station) која се налази у ваздухопловној бази Schriever у Колорадо Спрингсу. Распоред осталих станица приказан је на слици 17. Поред тога, контролни сегмент обухвата глобалну мрежу станица за праћење и станица за пренос података. Станице за праћење посједују високопрецизне GPS пријемнике које прате емитоване L-сигнале са сваког видљивог сателита. Сва прикупљена мјерења се преносе назад до главне контролне станице која затим врши обраду мјерења и процјену положаја GPS сателита, њихових брзина и грешака часовника. Поред обраде, MCS врши и процјену сателитске позиције и параметара часовника у наредних неколико дана. Количина података која се емитују према сателиту је довољна да сателит емитује навигационе поруке током једног или више

дана. Да би се то обезбиједило, пренос података је неопходно урадити најмање једном на сваких 45 минута [20].



Слика 17. Контролне станице за праћење GPS сателита [27]

Кориснички сегмент се састоји од радио пријемника/процесора и антена који примају GPS сигнале, одређују псеудодужине и рјешавају навигационе једначине како би добили координате и обезбједили тачно вријеме. За разлику од почетка развоја GPS система који је био првенствено за војну употребу, данас доминирају цивилни корисници. Временом су GPS чипови почели да се уграђују у ручне часовнике и мобилне телефоне. Као што је већ речено, GPS има веома широку примјену у различитим областима као на примјер: научна истраживања, пољопривреда, навигација, геодетски премјер, одређивање времена и др.

4.2. Структура GPS сигнала

На сложеност структуре GPS сигнала утичу сљедећи захтјеви GPS система: велики број корисника, позиционирање у реалном времену, висока прецизност одређивања брзине и позиције, комбинација војних и цивилних корисника [28]. GPS сателити емитују сигнале у L-фреквенцијском опсегу, означени као L1 и L2, чије су фреквенције 1575.42 MHz и 1227.60 MHz [25]. Структуру свих GPS сигнала чине сљедеће три компоненте (слика 18): носећи таласи, кодови и навигациони подаци.

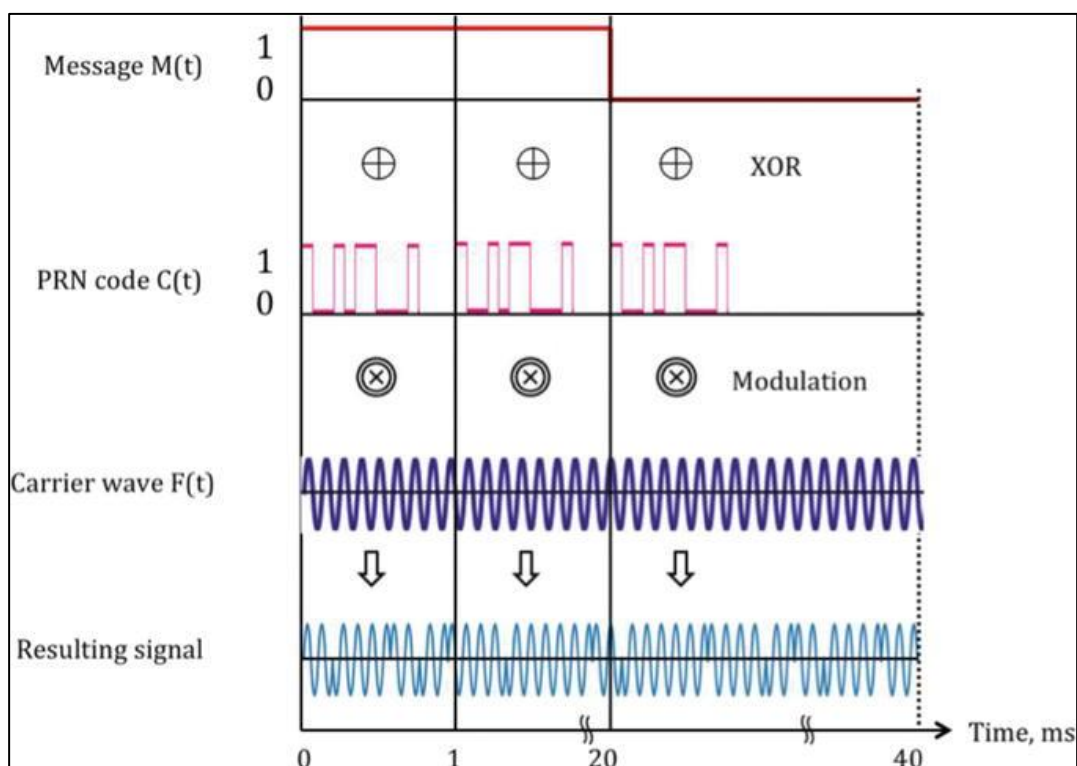
Носећи таласи представљају синусне таласе фреквенција $f_1 = 1575.42$ и $f_2 = 1227.60$ MHz чије су таласне дужине $\lambda_1 = 19.0$ cm и $\lambda_2 = 24.4$ cm [21].

Кодови се састоје од насумичног низа нула и јединица који не одају никакву правилност због чега се они често називају псеудослучајни шумови (PRN). Ипак,

њихова својства су резултат пажљиво осмишљеног математичког алгоритма. Помоћу ових кодова GPS пријемници одређују вријеме пута сигнала. Постоје двије врсте псеудослучајних кодова, а то су: јавно доступни C/A кодови и заштићени прецизни кодови P(Y). C/A кодови се емитују на фреквенцији 1.023 MHz и понављају се сваке милисекунде. P кодови се емитују на фреквенцији 10.23 MHz и понављају се тек сваких 267 дана [28]. Носећи таласи L1 су модулисани са C/A и P кодовима, док L2 садржи само P кодове.

Навигациони подаци представљају бинарно кодирану поруку која садржи податке о исправности и ефемеридима сателита, параметрима часовника, алманаху за све остале сателите у констелацији и информације о јоносфери [11], [21]. Контролни GPS сегмент генерише навигационе податке и преноси их до сателита, који се затим кодирају у навигационе сигнале и емитују корисницима. Декодирањем ових података пријемник може одредити позицију у реалном времену.

GPS сигнал се добија комбиновањем наведених компоненти процесима бинарног сабирања и фазне модулације [21].



Слика 18. Структура GPS сигнала [29]

4.3. Извори грешака приликом мјерења

Сва мјерења су оптерећена грешкама које потичу из различитих извора и деградирају тачност мјерења. Генерално, грешке које се јављају током GPS мјерења се могу класификовати у сљедеће групе [21], [28]:

- Грешке сателитског поријекла,
- Грешке услед простирања сигнала кроз атмосферу, и
- Грешке пријемника и антене.

Моделовањем се утицај великог броја грешака елиминише или умањује. У овим моделима постоји значајна веза између моделоване грешке и времена, позиције, температуре, и других фактора.

4.3.1. Грешке сателитског поријекла

Грешке које потичу од сателита су заправо грешке података о сателитским орбитама и часовницима. За њихово одређивање задужен је контролни GPS сегмент који поред одређивања врши и њихову предикцију. Према томе, јављају се и грешке одређивања и грешке предикције ових података [21].

Мале грешке у подацима сателитских ефемерида које емитује сваки сателит, узрокују одговарајуће грешке у сачуном положају сателита. Тачност одређивања ефемерида сателита износи 1 – 2 m, која директно утиче на тачност измјерених псеудодужина. С обзиром да тачност процјене ефемерида опада у току времена, два пута дневно се врши њихово ажурирање.

Поред контролног GPS сегмента, постоје научне организације које такође одређују позиције сателита. Најпознатија је Међународна GNSS служба (IGS) која обезбјеђује неколико категорија прецизних ефемерида, чија тачност варира у распону 2.5 - 5 cm.

Мјерења псеудодужина су блиско повезана са прецизним одређивањем времена. Због тога су GPS сателити опремљени атомским рубидијумским и цезијумским часовницима који веома стабилно одржавају своју фреквенцију. Поред велике прецизности ових часовника, неопходно је уводити корекције, јер је тешко извршити синхронизацију часовника на свим сателитима у реалном времену. Подаци о корекцији сателитског часовника садржани су у навигационој поруци. Након извршене корекције, преостала грешка је најчешће мања од неколико наносекунди што приликом одређивања псеудодужине производи грешку реда величине око 1 m.

За потребе прецизнијег позиционирања, IGS такође одређује одступања сателитских часовника у односу на системско GPS вријеме. Тачност ових одступања се креће од 0.075 – 3 ns, што множењем са брзином свјетлости износи приближно од 2 cm до 1 m [21].

4.3.2. Грешке услед простирања сигнала кроз атмосферу

Приликом простирања сигнала од GPS сателита до пријемника, сигнал пролази кроз различите слојеве атмосфере. Они се разликују по својим карактеристикама, а у зависности од утицаја на простирање сигнала, издвајају се тропосфера и јоносфера.

Јоносфера се простире приближно од 50 – 1000 km изнад површине Земље и састоји се од гасова који су јонизовани Сунчевим зрачењем. Јонизација ствара облаке слободних електрона који дјелују као дисперзивни медијум за GPS сигнале [25]. Карактеристике јоносфере показују дневну варијацију у којој је јонизација обично максимална касно поподне, а минимална после поноћи. Такође, додатне варијације су резултат промјена соларне активности. Првенствено се утицај јоносфере огледа у промјени брзине простирања сигнала у односу на брзину простирања кроз слободан простор изнад слојева јоносфере. Присуство јоносфере се другачије одражава на простирање GPS сигнала у зависности од групног и фазног индекса преламања. Према томе, јоносферска рефракција повећава кодне псеудодужине, док фазне умањује у односу на истиниту вриједност. Грешка услед утицаја јоносфере зависи од висине сателита изнад хоризонта. Најмања грешка је у тренутку када се сателит налази у правцу зенита, док се грешка повећава што је сателит ближи хоризонту. Вриједност грешке када се сателит налази у зениту варира од око 1 m током ноћи, па до чак 15 m током поподнева. Међутим, када је сателит ближе хоризонту, простирање сигнала је дуже кроз јоносферу, па и утицај грешке може достићи вриједност до 50 m. Утицај грешке би се могао смањити одбацивањем мјерења са сателита који се налази испод одређеног елевационог угла. Такође, већина утицаја ове грешке се може уклонити употребом двофреквентних пријемника.

Тропосфера обухвата доње дијелове атмосфере, од физичке површи Земље до висине која изнад полова износи око 8 km, док изнад екватора досеже до 18 km висине. Овај дио атмосфере се састоји од сувих гасова и водене паре. За разлику од јоносфере, тропосфера није дисперзивна средина, према томе тропосферско кашњење сигнала не зависи од фреквенције. Индекс преламања тропосфере се састоји од компоненте сувог ваздуха и компоненте водене паре. Компонента сувог ваздуха доприноси око 90% укупном кашњењу сигнала и може се једноставно моделовати. Тропосферска рефракција такође зависи од зенитног одстојања сателита, а поред тога значајан утицај имају и температура ваздуха, атмосферски притисак и парцијални притисак водене паре. Тропосферска рефракција деградира

тачност измјерених псеудодужина у правцу зенита око 2.3 m, док при нижим висинама сателита достиже и 15 m.

4.3.3. Грешке пријемника и антене

У ову групу грешака убрајају се: грешка часовника пријемника, грешка узрокована шумом пријемника, вишеструка рефлексија сигнала и варијација фазног центра антене [21].

Захтјеви тачности часовника пријемника су далеко мањи у односу на GPS сателитске часовнике. Према томе, GPS пријемници су обично опремљени кварцним осцилаторима. Грешка часовника се састоји од фреквенцијске и временске компоненте. Код савремених пријемника одступање часовника од системског GPS времена не прелази 1 ms, што у линеарним јединицама износи око 300 km. Грешка часовника пријемника се најчешће оцјењује као непозната величина у поступку обраде измјерених псеудодужина.

Шум пријемника утиче на тачност мјерења фазних и кодних псеудодужина. Однос сигнала и шума се изражава у децибелима (dB), а што је њихов однос већи, то је квалитетнији пријем сигнала. Због појаве шума у пријемнику, прецизност кодних псеудодужина износи око 1 m, док се прецизност фазних псеудодужина налази у распону 1 – 2 mm.

Вишеструкта рефлексија GPS сигнала је доминантан извор грешке, нарочито приликом диференцијалног GPS позиционирања. Објекти у близини пријемника могу једноставно рефлектовати GPS сигнал који се затим мијеша са директним сигналом у антени. Ово може произвести грешку кодних псеудодужина од неколико метара, док фазне псеудодужине не могу имати већу грешку од око 5 cm услед вишеструке рефлексије. Утицај ове грешке се може умањити уколико се GPS пријемник не поставља у близини површина које могу изазвати рефлексију сигнала.

Фазни центар антене је замишљена тачка антене у којој се врши пријем сигнала емитованих са сателита. Варијација фазног центра током времена је у функцији азимута и зенитног одстојања путање сигнала. С обзиром да се његов положај мијења, врши се одређивање његовог средњег положаја. Одступање стварне тачке пријема сигнала од средњег положаја може достићи центиметарски ниво. Да би се извршило моделовање фазног центра, неопходно је обавити калибрацију антене, која се састоји из ексцентрицитета и варијација фазног центра [11], [30].

4.4. Математички модел GPS мјерења

Математички модел GPS мјерења се састоји од функционалног и стохастичког дијела. Функционалним моделом се успоставља веза између мјерених и непознатих величина, које у најчешћем случају представљају координате непознатих тачака. Чињеница да се GPS мјерења обрађују методом најмањих квадрата са циљем добијања оптималних оцјена непознатих параметара, доводи до потребе за дефинисањем и стохастичког модела. Помоћу њега се сваком мјерењу додјељује стандардно одступање које описује његову тачност.

4.4.1. Функционални модел GPS мјерења

Псеудодужина представља удаљеност између GNSS сателита у тренутку емитовања сигнала и антене пријемника у тренутку пријема сигнала. Под претпоставком да нема грешака, псеудодужина би била једнака геометријском растојању. Међутим, у реалним условима псеудодужина није једнака геометријском растојању, због различитих утицаја међу које спада грешка часовника, утицај атмосфере, рефлексија сигнала и други ефекти.

Функционални модел кодних псеудодужина. Кодна псеудодужина се добија поређењем примљених кодова са кодовима које пријемник сам генерише. Поједностављено се измјерена кодна псеудодужина може представити сљедећим изразом [11]:

$$p = \rho + c \cdot (dt - dT) + I + T + \varepsilon \quad (2)$$

гдје је ρ геометријско растојање између пријемника и сателита, c брзина свјетлости, dt и dT грешке часовника пријемника и сателита у одређеном тренутку времена, I јоносферско кашњење сигнала, T тропосферско кашњење сигнала, ε случајна грешка мјерења.

Функционални модел фазних псеудодужина. Фазна псеудодужина се добија тако што GPS пријемник упоређује фазу примљеног носећег сигнала и фазу носећег сигнала којег сам генерише. Фазне псеудодужине се могу поједностављено представити сљедећим изразом [11]:

$$\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda \cdot N - I + T + \varepsilon \quad (3)$$

гдје поред већ наведених чланова кодних псеудодужина фигурише N - фазна неодређеност и λ - таласна дужина.

Фазна неодређеност настаје из разлога што су носећи таласи периодични синусни таласи, тако да пријемник може мјерити фазну разлику у оквиру једне таласне дужине. Она не зависи од времена све док пријемник прати сигнал са истог сателита. Поред тога, код фазних псеудодужина предзнак за јоносферско кашњење је негативан из разлога што присуство јоносфере скраћује фазне псеудодужине.

Рјешавањем фазних неодређености, остварује се милиметарска прецизност фазних псеудодужина, што их чине погодним за примјену у рјешавању геодетских задатака.

4.4.2. Стохастички модел GPS мјерења

Псеудодужине измјерене са одређене станице према различитим сателитима немају исту тачност. Тачност мјерења је условљена висином сателита изнад хоризонта, односно временом простирања сигнала кроз јоносферу и тропосферу. Поред тога, на тачност утиче и рефлексија сигнала од околних површина која такође зависи и од висине сателита.

У складу са претходно наведеним, долазимо до закључка да је тачност мјерења псеудодужина у функцији вертикалног угла α , односно зенитног одстојања z . Генерално, тачност псеудодужина расте са повећањем вертикалног угла сателита изнад хоризонта, односно смањењем зенитног одстојања. Уколико се стандард псеудодужине у правцу зенита означи са σ_0 , при чему је $\alpha = 90^\circ$ или $z = 0^\circ$, тада се стандард измјерене псеудодужине може представити сљедећим изразом [21]:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_0}{\sin \alpha} = \frac{\sigma_0}{\cos z} \quad (4)$$

Коваријансе су вандијагонални елементи коваријационе матрице којима је изражена различита врста физичке корелације између GPS мјерења. Физичке корелације подразумевају просторну, временску и корелацију фреквенција, и оне се обично не укључују у стохастички модел GPS мјерења [11].

5. ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ

Временска серија се користи за праћење неке статистичке појаве и представља уређени низ мјерења, који је реализован у различитим епохама, најчешће у једнаким временским интервалима. Временске серије GNSS координата нуде врло прецизне процјене положаја и брзина GNSS антене, што заправо представља основне податке за геодинамичка истраживања [11], [31].

Анализом временских серија постиже се проналажење модела помоћу којег се описује законитост у понашању одређеног динамичког система, и предвиђање његовог будућег стања на основу познатих стања у садашњости и прошлости.

Велики искорак у геодинамичким истраживањима начињен је развојем GNSS технологије. Временске серије координата добијених континуираним GNSS мјерењима омоћавају проучавање тектонских помјерања, деформација Земљине коре, вулкана, као и осталих геодинамичких појава. У неколико посљедњих деценија континуирани GNSS подаци се широко примјењују за праћење тектонских кретања и деформација Земљине коре на глобалном нивоу.

Прије саме процјене брзина станица, неопходно је извршити анализу карактеристика шума и периодичног сигнала. Статистичком анализом обојеног шума долази се до поузданије процјене несигурности брзине станице. Моделовање периодичних сезонских сигнала који настају због атмосферских, хидролошких, топлотних и локалних утицаја на околину, је значајно због њиховог утицаја на временске серије [11].

У наставку поглавља дата је дефиниција временских серија и извршена је њихова класификација. Поред тога, описан је математички модел временске серије GNSS координата и значај анализе временских серија.

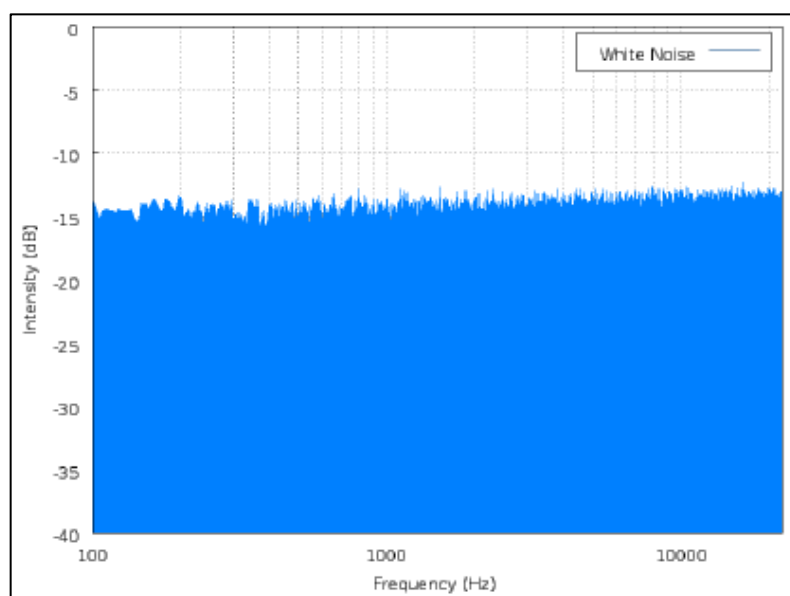
5.1. Дефиниција и подјела временских серија

Уопштено, временска серија се може дефинисати као уређени низ опажања, при чему се уређивање најчешће врши у односу на вријеме и то обично у једнаким временским интервалима. Важно је нагласити да унутар временских серија појединачна опажања нису међусобно независна из разлога што се мора узети у обзир њихов временски поредак. У анализи временских серија управо се користи ова међусобна зависност са циљем формирања модела временске серије, након чега се он користи да се на основу прошлих опажања изврши прогноза будућег опажања [32].

Модели временских серија представљају различите стохастичке процесе. Да бисмо дефинисали појам стохастички процес, неопходно је кренути од појма случајне промјенљиве. По дефиницији, случајна промјенљива представља функцију могућих исхода статистичког експеримента. Уколико се прати њен развој у току времена, у том случају она постаје и функција времена. Скуп таквих функција представља стохастички или случајни процес, односно стохастички процес је функција исхода статистичког експеримента и времена. У складу са тим, временска серија представља једну реализацију стохастичког процеса [32].

За проучавање геофизичких појава често се користе уопштени стохастички процеси који имају једноставна математичка својства. Приликом детаљније анализе временских серија GNSS координата, неопходно је посветити пажњу и шумовима који представљају стохастички дио временске серије. С обзиром да анализа шума не улази у оквир истраживања у практичном дијелу мастер рада, у наставку ће бити представљене само главне карактеристике шума који се јављају у временским серијама GNSS координата.

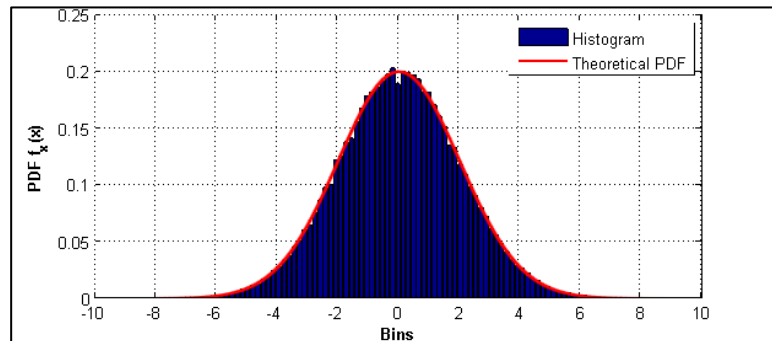
Гаусов шум представља статистички шум који има вјероватноћу функције густине PDF (енгл. Probability Density Function) једнаку функцији нормалне расподеле [11]. Посебан случај Гаусовог шума јесте фракцијски Гаусов шум (слика 19), односно бијели шум код којег су вриједности у било ком тренутку једнако распоређене и статистички независне. Назив бијели шум произилази из фреквентне анализе овог процеса која указује да све фреквенције имају исти допринос на варијансу процеса.



Слика 19. Бијели шум [33]

Бијели шум је дефинисан и описан употребом теорије дистрибуција, према којој представља потупно случајан процес, који на извјестан начин кореспондира случајној грешци линеарног модела [11].

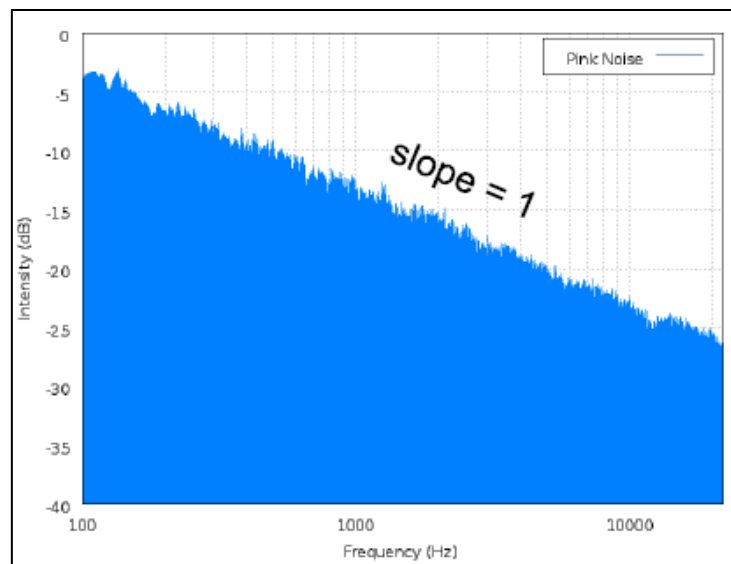
У складу са тим, бијели шум је случајан сигнал који има константну спектралну густину снаге и представља временски некорелисану појаву. У дискретном времену, бијели шум представља дискретан сигнал чији су узорци слијед серијски некорелисаних случајних промјенљивих са нултом средњом вриједношћу и коначном варијансом (слика 20).



Слика 20. Теоретски PDF и симулирани хистограм бијелог Гаусовог шума [34]

Честим мјерењима и њиховим осредњавањем може се прилично смањити учинак бијелог шума који је независан од фреквенције. Иако бијели шум не садржи информације од значаја за геофизичка истраживања, за његово филтрирање неопходно је знати његове статистике.

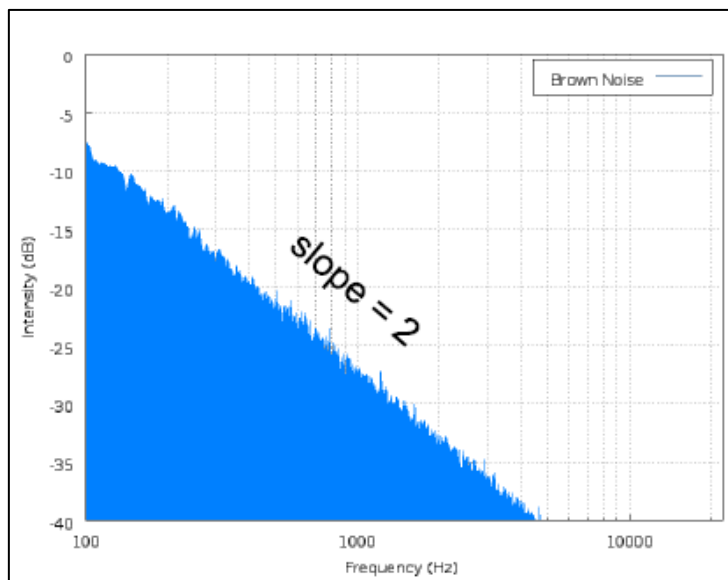
Фракцијско Брауново кретање које обухвата шум треперења (слика 21) и шум случајног хода (слика 22) односно обојене шуме, јесте нестационарни процес који се још назива и Винеров процес. Код ових процеса средња вриједност и варијанса зависе од времена.



Слика 21. Шум треперења [33]

Обојени шумови имају више снаге на нижем нивоу фреквенције, при чему је она код шума треперења пропорционална $1/f$, док је код шума случајног хода пропорционална $1/f^2$ [11].

Шум случајног хода представља статистички процес који описује пут који се састоји од низа случајних корака на неком математичком простору. Он служи као основни модел за забиљежену стохастичку активност. Мала компонента шума случајног хода може имати значајан утицај приликом процјењивања грешке тренда и из тог разлога је значајно квантификовати њену величину [11], [35].



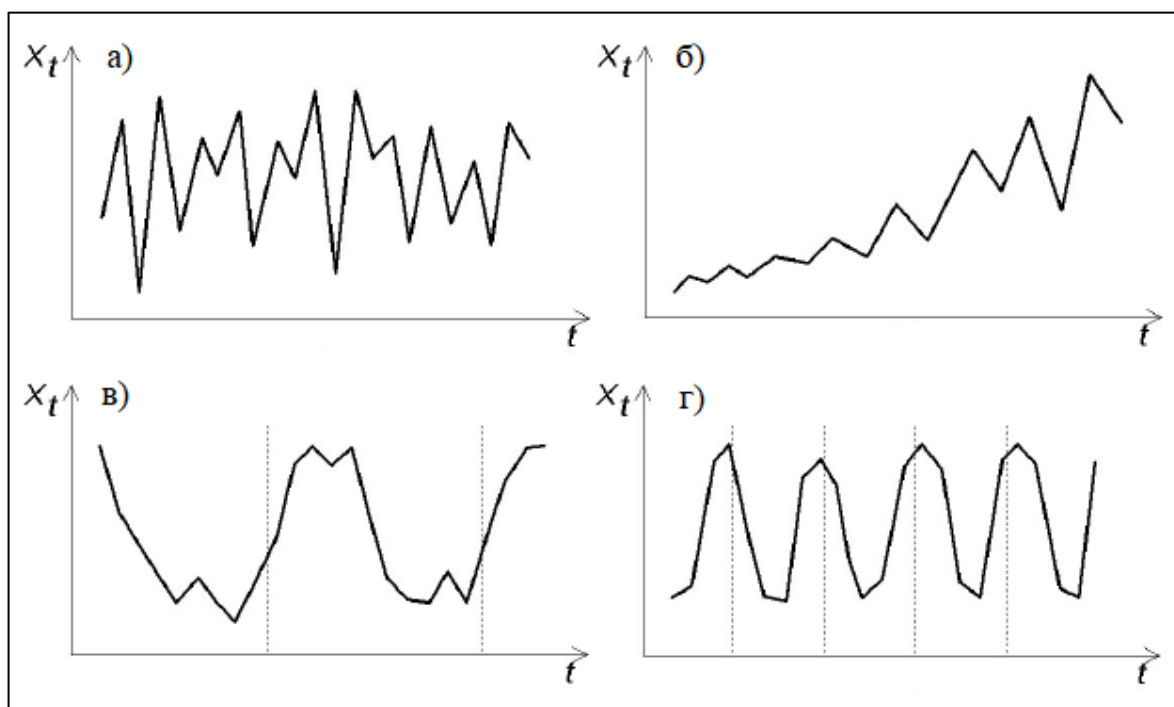
Слика 22. Шум случајног хода [33]

Приликом обраде временских серија GNSS координата пожељно је узети у обзир процјену грашака GNSS шумова у боји. Анализа шума не омогућава средства за његово смањење. Ипак, извршена класификација различитих компоненти шума може открити његов извор чиме се повећава тачност и прецизност. За разлику од бијелог шума, код обојених шумова честа мјерења и њихова осредњавања немају никакав значај и мање су корисни.

Постоји више различитих критеријума на основу којих се може извршити класификација временских серија. Прије свега, можемо их подијелити на *непрекидне* и *прекидне*. Код непрекидних временских серија опажања се могу регистровати у сваком тренутку времена, док се код прекидних опажања прикупљају у истим временским интервалима. Даље, уколико се ниво серије не мијења у току времена, ријеч је о *стационарним* серијама, док у случају повећања нивоа током времена говоримо о *нестационарним*.

На слици 23. приказани су карактеристични типови временских серија, при чему је са X_t означено опажање временске серије у тренутку t . За временску серију

приказану под а) карактеристична су случајна одступања око константног нивоа. Због тога се за овакве временске серије каже да су стационарне у средини, односно ниво серије се не мијења током времена. Примјер нестационарне серије дат је под б), коју карактерише изражен тренд са случајним флукуацијама око узлазног тренда. Код оваквих серија се ниво повећава током времена. Под в) и г) су приказане серије чије се варијације у нивоу понављају периодично. Разлика је у периоду њиховог понављања. Уколико је период понављања дужи од годину тада се ради о серијама са цикличним варијацијама, док за случај када је период мањи од годину дана, тада говоримо о серијама са сезонским варијацијама.



Слика 23. Различити типови временских серија: а) константан процес, б) процес са трендом, в) серија са цикличним варијацијама и г) серија са сезонским варијацијама [32]

5.2. Математички модел временске серије GNSS координата

Математички модел временске серије GNSS координата може се представити у облику збира детерминистичког (функционалног) и стохастичког дијела (шума). Детерминистички дио се односи на дугорочне трендове и сезонске промјене, док стохастички дио остаје након уклањања детерминистичког модела из података [11].

Све компоненте временске серије GNSS координата не представљају само линеарну промјену, већ и значајне нелинеарне промјене у условима сезонских сигнала, дефинисане као годишње и полугодишње промјене. Линеарне промјене се огледају у покретима тектонских плоча, док нелинеарне промјене проистичу из неидентификованих унутрашњих грешака GNSS технологије, као и спољашњих геофизичких ефеката. Неправилности које су детектоване уз помоћ GNSS станица

могу указивати на различите геодинамичке процесе или на грешке код мјерних инструмената [11].

Сљедећи облик представља комплетан линеарни модел за временску серију GNSS координата који се односе на једну компоненту положаја [11], [36]:

$$y(t_i) = a + \sum_{i=1}^n b_i(t_i - t_0)^i + \sum_{i=1}^{n_p} (c_i \sin(2\pi t_i/p_i) + d_i \cos(2\pi t_i/p_i)) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - t_{gj}) + \sum_{i=1}^{n_A} (c_{Ai} + A H \ln(1 + \frac{t_i - t_{eq}}{\tau})) + \sum_{i=1}^{n_e} (t_{ei}) \quad (5)$$

гдје је y – дневна рјешења временске серије GNSS координата, t_i ознака серије од n елемената, при чему $i = 1, \dots, n$, a – положај станице, b_i – линеарна брзина станице. Коефицијенти c_i и d_i у моделу описују годишње и полугодишње амплитуде периодичних кретања. Сљедећи термини у моделу описују изненадне појаве које су проузроковане опремом или сеизмичким догађајима, за било који број одступања n_g величине g и епохе t_{gj} , користећи Хевисајдову функцију (јединична одскочна функција која се користи у обради сигнала, како би се представио сигнал који мијења стање). Поред тога, t_{eq} је вријеме земљотреса (представља вријеме главног удара), c – косеизмичко помјерање након земљотреса (моделује се логаритамском или експоненцијалном функцијом), A – амплитуда поједностављеног Оморијевог закона, τ – временско кашњење појаве постсеизмичке деформације након главног удара. Преостали термин у моделу t_{ei} означава грешке мјерења, тј. све преостале промјене, које се могу приписати другим случајним или систематским нестабилностима.

Хевисајдова функција одговара помјерањима у временским серијама, која су најчешће посљедица сеизмичких догађаја или промјена инструмената, софтвера или референтног оквира. Линеарни израз аналоган је положају и брзини промјене GNSS антене, док су хармонијске компоненте укључене за моделовање годишњих, сезонских и феномена који зависе од високих фреквенција присутних у временским серијама. Хармонијском анализом временских серија GNSS координата долази се до сезонских варијација најчешће са годишњим или полугодишњим периодом. Приликом анализе координата временске серије GNSS координата периодични сигнали се узимају у обзир као елементи функционалног модела [11].

Као што је већ речено, након одузимања детерминистичког дијела из података, остају GNSS резидуали. На основу резидуала закључује се колико математички

модел одговара изворним подацима. Прије тога, требало би извршити моделовање и уклањање свих осцилација у GNSS подацима.

5.3. Анализа временских серија

Анализом временских серија настоји се описати посматрана појава, објаснити њен узрок, затим процјенити њено кретање у наредном периоду и коначно извршити њена контрола манипулацијом величина које на њу утичу [32].

Анализа временских серија, с обзиром на домен анализе, може се подијелити на анализу у временском домену и у фреквентном домену. Анализа у временском домену је заснована на посматрању опажања временске серије као функције времена. За ову врсту анализе користи се аутокорељациона функција којом је описана међусобна зависност два опажања временске серије удаљена међусобно за одређени временски период. Приликом анализе у фреквентном домену опажања временске серије су представљена као функција фреквенције. Током анализе у фреквентном домену користи се спектрална функција густине, која указује на допринос појединачних компонентни на различитим фреквенцијама, укупној варијанси временске серије [32].

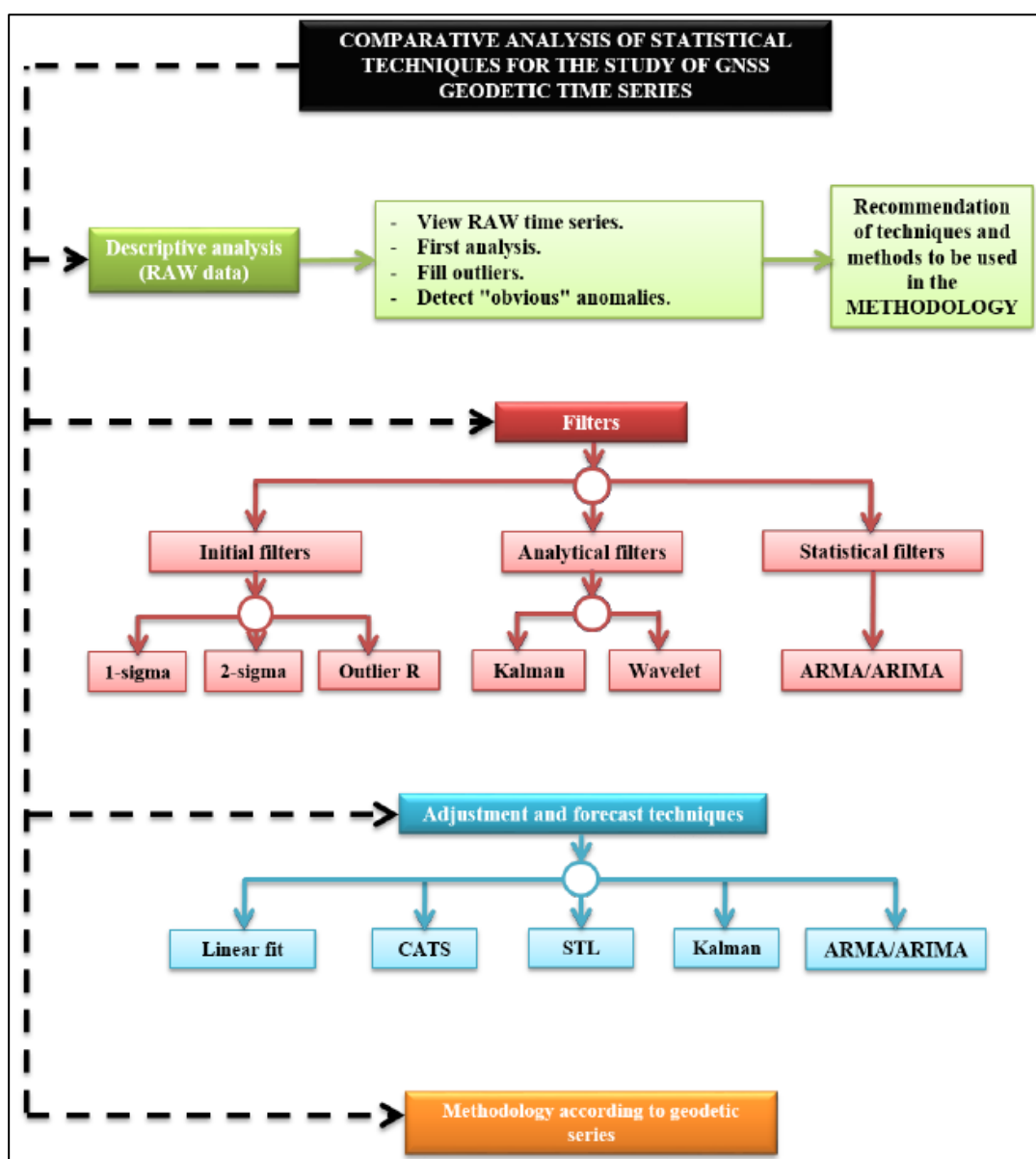
Временска серија се у складу са методом декомпозиције састоји од четири компоненте које се комбинују на адитиван или мултипликативан начин, а то су: *тренд, циклична, сезонска и случајна компонента*. Анализом се врши оцјена прве три компоненте на основу прикупљених података, а потом се њиховом екстраполацијом долази до прогноза будућих вриједности серије.

GNSS мреже за геодинамичка истраживања заснивају се на перманентним станицама које континуирано прикупљају податке. Добијене позиције које чине временске серије, су првобитно изражене у геоцентричним координатама (X, Y, Z). Како би појам помјерања одређене локације постао интуитивнији, геоцентричне координате се трансформишу у топоцентричне и тако се добијају три компоненте (N, E, U) које редом представљају сјевер, исток и издизање. На основу анализе временских серија долазимо до вектора брзине помјерања као и аномалија које су могле настати у периоду обухваћеним временском серијом.

Топоцентричне GNSS временске серије су оптерећене грешкама које потичу из различитих извора. Према томе, прецизност ефемерида, корекција сателитског осцилатора, параметара Земљине ротације, тропосферски и јоносферски утицај, стабилност станице, вишеструка рефлексија, итд. пресудно утичу на квалитет срачунате временске серије. Постојање опажања са грешкама, губитак опажања

услед препрека, шумови који потичу од других сигнала и остало, чине неопходним претходну дескриптивну анализу измјерене временске серије. Анализом сирове серије постиже се детектовање аутлејера, грубих грешака и посебно нивоа шума [37].

Како би се умањео или елиминисао ниво шума у временској серији, развијене су различите технике филтрирања које можемо подијелити на: иницијалне, аналитичке и статистичке. Након филтрирања врши се изравнање како би се издвојиле информације о геодинамичком понашању одређене GNSS серије. У овом процесу је битно дефинисати циљ који се жели постићи. С обзиром на разлике у погледу хоризонталних компоненти и вертикалне компоненте, линеарног и нелинеарног понашања временске серије и слично, не постоји јединствена метода за анализу сваке временске серије. Према томе, развијени су различити поступци анализе временских серија који су приказани на слици 24.



Слика 24. Методе анализе GNSS временских серија [37]

Суштина почетног филтрирања примјењеног на GNSS серију се огледа у елиминацији података који по вриједностима веома одскачу од остатка серије. Филтери 1-sigma и 2-sigma елиминишу податке у зависности од удаљености тачака серије од линеарне линије регресије. Међутим, уколико се ради о нелинеарним серијама, овај процес се одвија по линеарним пресјецима унутар серија.

С обзиром да је у мастер раду извршена примјена Калман филтера на временске серије GNSS координата, овај филтер ће бити детаљније описан у сљедећем поглављу.

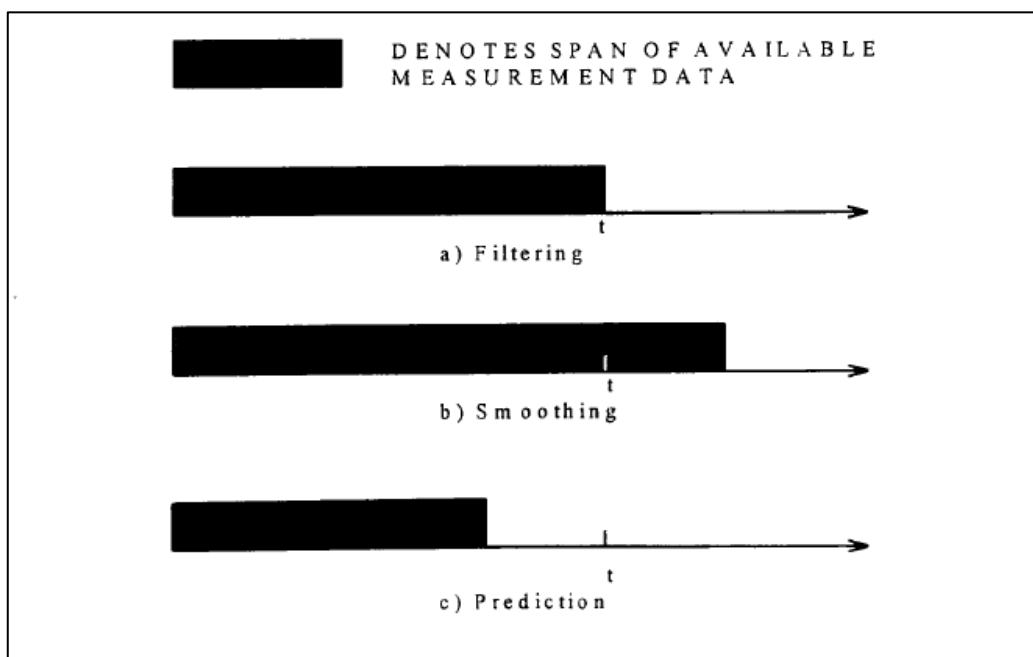
6. КАЛМАНОВ ФИЛТЕР

Калманов филтер представља метод оптималне процјене који се користи у анализи динамичког система. Развијен је од стране Р. Е. Калмана 1960. године. Параметри који се процјењују овом методом варирају са временом или имају временске варијације. Калманов филтер је модерни облик технике процјене најмањих квадрата LSE (енгл. Least-squares estimation) коју је први дефинисао К. Ф. Гаус 1975. године [38].

Техника процјене најмањих квадрата обезбјеђује оптималну процјену прекомјерних мјерења која су временски инваријантна. LSE је заснован на функционалном и стохастичком моделу. Уз помоћ функционалног модела успоставља се веза између мјерења и непознатих параметара, док стохастички модел описује статистику мјерења, односно дефинише њихову прецизност. У већини случајева једначине у функционалном моделу нису линеарне, па их је неопходно линеаризовати.

Као што је већ речено, LSE врши само процјену временски непромјенљивих параметара. Међутим, моделовање тектонских помјерења врши се на основу одређених брзина станица, односно њихових помјерања током времена која су садржана у временским серијама GNSS координата. Према томе, процјена брзина се постиже употребом Калмановог филтера над мјерењима која варирају у времену.

Оптимална процјена се састоји из три дијела: предвиђања (*prediction*), филтрирања (*filtering*) и изглађивања (*smoothing*). Они се разликују у зависности од односа између посљедњих доступних података и тренутка процјене (слика 25).



Слика 25. Три типа процјене у одређеном тренутку времена [38]

Калманов филтер је једна од најчешће коришћених техника оптималне процјене која се може користити за сва три случаја приказана на слици 25. Генерано, процес процјене Калмановог филтера се може подијелити на континуирани и дискретни, при чему се они могу представити сљедећим једначинама које описују динамички систем и систем мјерења [39]:

$$\dot{X} = F(t) \cdot X(t) + G(t) \cdot w(t), \text{ динамички систем} \quad (6)$$

$$\tilde{Z} = H(t) \cdot X(t) + v(t), \text{ систем мјерења}$$

$$X_k = \Phi_{k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} \omega_{k-1}, \text{ динамички систем} \quad (7)$$

$$\tilde{Z}_k = H_k \cdot X_k + v_k, \text{ систем мјерења}$$

гдје је $F(t)$ динамичка матрица, $X(t)$ вектор стања система, $G(t)$ поремећајна конфигурациона матрица, $w(t)$ поремећајна функција (системски шум), $\tilde{Z}$ вектор опажања, $H(t)$ конфигурациона матрица опажања, $v(t)$ мјерни шум, Φ транзициона матрица, Γ конфигурациона матрица системског поремећаја. Једначине под (6) се односе на континуирано вријеме, док се под (7) односе на дискретно вријеме, при чему чланови X_k и $\tilde{Z}_k$ садрже компоненте положаја (N, E, U).

6.1. Уопштено о Калмановом филтеру

Калманов филтер је алгоритам који рачуна најбољу процјену вектора стања линеарног динамичког система, одређеног мјерењима линеарне функције вектора стања у дискретном времену, која су загађена адитивним бијелим Гаусовим шумом. Поред тога, Калманов филтер врши квантификовање несигурности у процјени вектора стања, користећи коваријациону матрицу грешака процјене. Мјерења се могу прикупљати у произвољним дискретним тренуцима времена који морају бити тачно познати. Такође, коваријационе матрице грешака мјерења и шума процеса могу бити временски пормјенљиве, али њихове вриједности морају бити познате [40]. Према томе, Калмановим филтером врши се процјена тренутног стања система, на основу познатих претходних стања и мјерења.

Филтер ради итеративно, при чему се могу издвојити два корака:

- Фаза предвиђања – на основу претходних процјена стања система и информација динамичког модела, врши се процјена стања у тренутном времену. Ова процјена стања позната је и као а priori процјена.

- Фаза ажурирања – комбинацијом претходне процјене стања са разликом између априори предвиђања и тренутних информација опажања, врши се нова процјена која је позната као а постериори процјена стања.

Калманов филтер се користи за филтрирање и глађење (*smoothing*) података, што значи да се његовом примјеном може смањити утицај шума у мјерењима. Неопходно је истаћи да је имплементација Калман филтера најефикаснија на линеарним системима и да је његова употреба ограничена у случајевима када систем није строго линеаран. У том случају, могу се користити варијације Калмановог филтера, као што су Extended Kalman Filter (EKF) и Unscented Kalman Filter (UKF).

6.2. Нелинеарни Калманов филтер

Као што је претходно речено, EKF и UKF су двије варијанте Калман филтера које се користе за процјену стања у нелинеарним динамичким системима. Наведене методе су развијене због тога што је класични Калман филтер ограничен на линеарне системе.

Extended Kalman Filter (EKF) представља генерализацију Калмановог филтера која је добро прилагођена за већину нелинеарних система. У EKF-у се стање нелинеарног система апроксимира његовом линеаризацијом, коришћењем првог члана парцијалних извода Тејлоровог реда око тренутне процјењене средње вриједности стања и коваријансе. Да би линеарна апроксимација правилно конвергирала, систем не треба бити екстремно нелеинеаран и вриједности почетног стања и варијансе морају бити прецизне. Уколико је систем линеаран EKF би дао исте резултате као и стандардни Калманов филтер [41].

UKF представља новију верзију Калмановог филтера за нелинеарне системе у којима такозвана трансформација „без мириса“ превазилази недостатке EKF линеаризације, гдје се претпоставља да је ширење коваријансе стања линеарно [41], [42]. У UKF-у, непозната дистрибуција вјероватноће стања је апроксимирана дискретизованом верзијом, користећи неколико узоркованих вриједности стања које се називају „сгима тачке“. Дистрибуција вјероватноће новог процјењеног стања се добија из пропагације сигма тачака директно кроз нелинеарни модел.

Постоје разне дискусије која од ове двије верзије филтера је боља и ефикаснија за примјену. У случају линеарних система дају сличне резултате, али је UKF 2-3 пута бржи. У суштини, обе варијанте Калман филтера се користе за нелинеарне системе, а избор између њих зависи од карактеристика конкретног система и захтјева за прецизношћу и нумеричком стабилношћу.

6.3. Примјена

Калманов филтер је веома користан алгоритам који се употребљава за проблеме линеарне Гаусове процјене [40]. Веома је популаран и заступљен у практичним примјенама. Калманов филтер има бројне примјене у различитим инжењерским областима, роботици, економији, обради сигнала, а посебно је погодан за задатке као што су праћење положаја покретних објеката, односно навигацији и контроли возила, нарочито авиона и свемирских летјелица.

Калманов филтер се такође примјењује у анализи временских серија које се користе приликом обраде сигнала или у економетрији. Поред тога, Калманов филтер чини основу планирања роботског кретања и контроле и може се користити за оптимизацију трајекторије.

Калманов филтер представља прецизну методу помоћу које се из епохалних геодетских мјерења могу извести брзине GNSS станица [38]. Примјеном Калмановог филтера, приликом анализе временских серија положаја GNSS станица, могу се процијенити деформације Земљине коре.

7. МОДЕЛОВАЊЕ ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА GNSS КООРДИНАТА

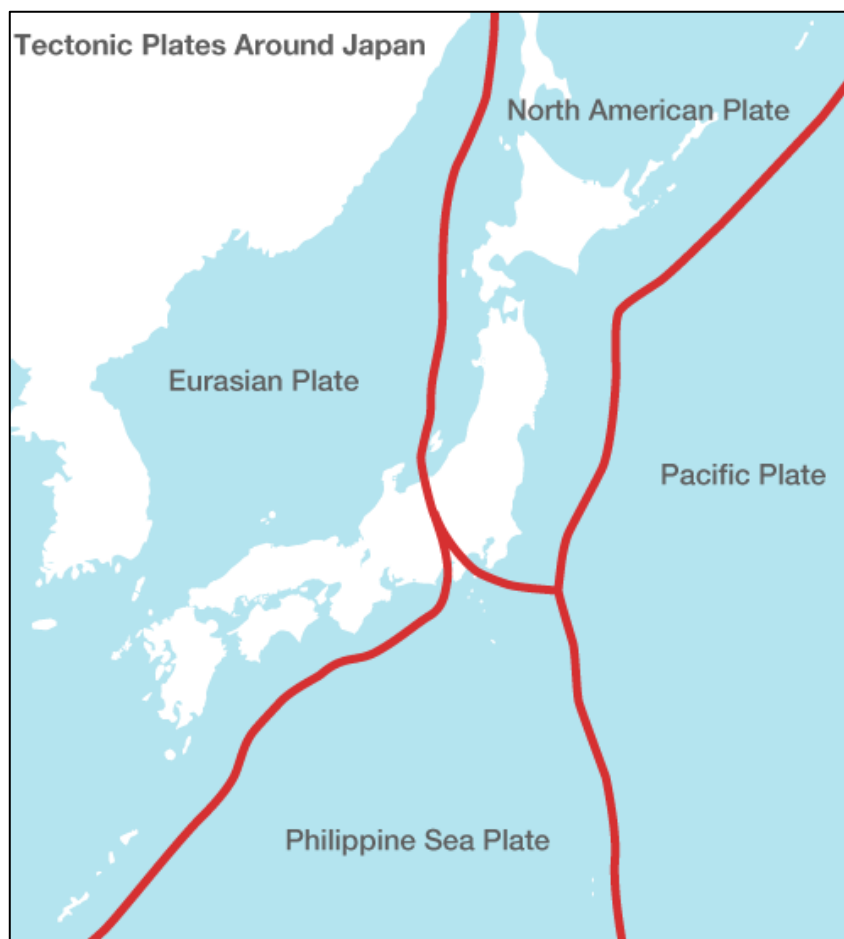
Приликом процјене деформације Земљине коре и истраживања геофизичких појава, у посљедњих неколико деценија се све масовније користе континуирана GNSS мјерења. На основу GNSS мјерења долази се до процјене тродимензионалног положаја станица са прецизношћу од неколико милиметара до неколико центиметара. Праћењем промјене положаја током времена долази се до хоризонталних и вертикалних деформација Земљине коре, које су посљедица различитих геофизичких појава.

Временске серије се састоје од позиција станица које су првобитно изражене у геоцентричним координатама (X, Y, Z). Како би појам помјерања одређене локације постао интуитивнији, геоцентричне координате се трансформишу у топоцентричне. На тај начин се долази до три компоненте (N, E, U) које редом представљају сјевер, исток и издизање. Анализом временских серија долазимо до вектора брзине помјерања као и аномалија које су могле настати у периоду обухваћеним временском серијом.

Основни циљ мастер рада представља моделовање тектонских помјерања на основу анализе временских серија GNSS координата примјеном Калман филтера.

7.1. Подручје истраживања

Јапан је острвска држава у источној Азији у чијем саставу се налази 6852 острва од којих су највећа: Хокаидо, Хоншу, Шикоку и Кјушу. Јапанска острва су дио геолошки веома нестабилног подручја које се назива Пацифички ватрени прстен. Овај простор карактерише велики број сеизмичких и вулканских активности. Већина земљотреса је посљедица тектонских помјерања, која доводе до интеракције Пацифичке, Филипинске, Сјеверноамеричке и Евроазијске плоче (слика 26). Најпознатији вулкан је Фуџи који је уједно и највиши врх Јапана са висином од 3776 m. Неки од многобројних земљотреса су веома разорни као на примјер земљотрес Тохоку 2011. године. Према томе, Јапанци улажу доста напора и средстава у геодинамичка истраживања, а као резултат тога 2000. године израђена је мрежа од 1200 GPS станица.



Слика 26. Распоред тектонских плоча на подручју истраживања [43]

7.2. Приступ подацима

Геодетска лабораторија Неваде NGL (енгл. Nevada Geodetic Laboratory) спроводи истраживања у области сателитске геодезије са циљем проучавања научних проблема који имају регионални и глобални значај [44]. За потребе проучавања тектонске и геотермалне активности користи се Глобални позициони систем. Главни циљ истраживања ове лабораторије представља деформација Земље у различитим временским тренуцима и на различитим просторима. Деформације у највећој мјери настају услед кретања тектонских плоча. На граничним зонама плоча јављају се сеизмичке активности. Управо се квантификовањем деформација на граничним зонама плоча жели у што већој мјери схватити сложена интеракција сила које доводе до сеизмичких процеса [44].

Подацима мреже GPS станица, који се ажурирају на седмичном, дневном, па чак и петоминутном нивоу, се може приступити преко NGL веб сервиса (слика 27). NGL публикује метаподатке, листе станица, графиконе позиција координата и табеле са подацима. Поред локације станице, доступни су подаци о временским серијама у различитим форматима: *tenv3*, *tenv*, *xyz*, *kenv*, *trop*, *QA file*. Такође, за сваку станицу

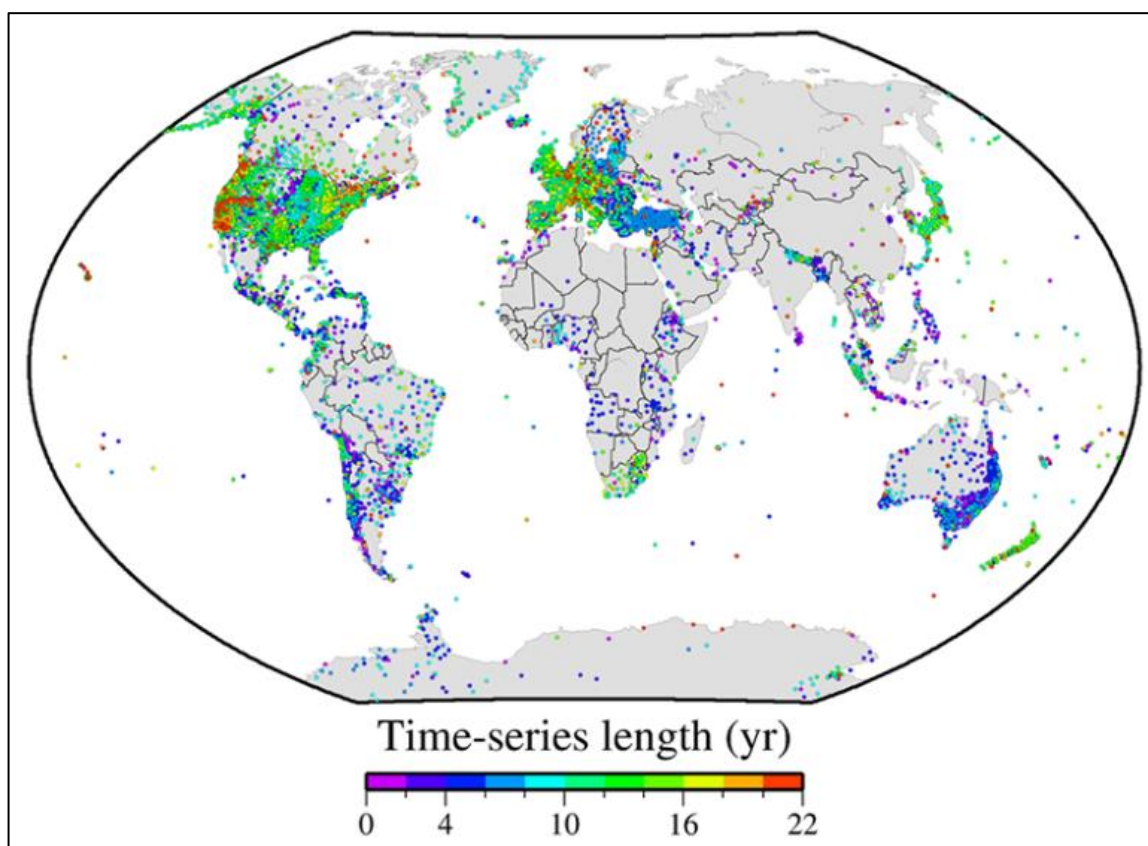
су доступне информације о промјени опреме или о земљотресима у близини станице који су обрађени од стране USGS (енгл. United States Geological Survey).

Time Series Data (ascii text)		
24 Hour Final Solutions		
IGS14	tenv3 or tenv	xyz
PA	tenv3	
PS	tenv3	
24 Hour Rapid Solutions		
IGS14	tenv3	
PA	tenv3	
PS	tenv3	
5 Minute Final Solutions		
IGS14	kenv tar files for download	
5 Minute Rapid Solutions (last 60 days max)		
IGS14	kenv tar file download	
Quality Assurance (QA) Files		
IGS14	.qa.gz file download	
5 Minute Troposphere Solutions		
Tot./Wet Zenith Delay, etc.		tar file download
New!: Loading Predictions. See this README file for explanation.		
IGS14	tenv3 file with extra columns	

Слика 27. Доступни подаци на веб сервису NGL [44]

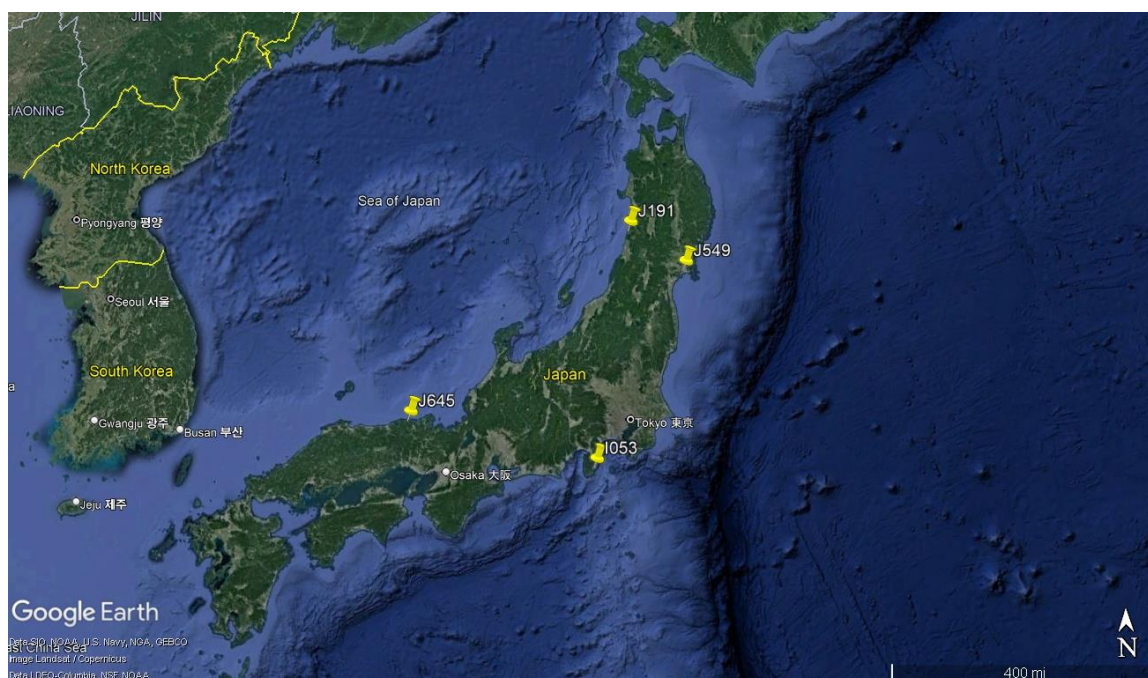
NGL узима сирове GPS податке са више од 17000 станица широм Свијета (слика 28) и затим врши њихову обраду. На основу слике можемо закључити да је подручје Јапана густо покривено мрежом GPS станица са временским серијама у трајању око 14 година. Коначни NGL производи се могу користити за различита

истраживања као што су помјерање тектонских плоча или побољшање глобалног референтног оквира за проучавање промјене глобалног нивоа мора [44].



Слика 28. Дужина временских серија за GPS станице чије податке обрађује NGL [45]

За потребе моделовање тектонских помјерања анализиране су временске серије четири GPS станице приказане на слици 29. Све станице се налазе на јапанском острву Хоншу.



Слика 29. Позиције станица

Временске серије GNSS координата континуираних мјерења су преузете са сљедећих GNSS станица:

1. J549 – налази се у префектури Miyagi у близини града Higashimatsushima,
2. J191 – налази се у префектури Akita у близини града Nikaho,
3. I053 – налази се у префектури Shizuoka у близини града Kawazu,
4. J645 – налази се у префектури Hyogo у близини града Kami.

Референтни оквир за све станице је IGS14 који је за већину практичних задатака еквивалентан међународном терестричком референтом оквиру ITRF14. Координате станица приказане су у табели 2. Временски интервал опажања се налази у распону од почетка 2009. до августа 2023. године.

Табела 2. Координате станица

Координате	J549	J191	I053	J645
Латитуда	38.425°	39.206°	34.751°	35.621°
Лонгитуда	141.213°	139.908°	138.990°	134.677°
Висина	49.081 m	47.294 m	52.721 m	70.208 m

7.3. Примјена SARI софтвера за анализу временских серија

Временске серије GNSS координата садрже сигнале који су изазвани деформацијом Земље, али и систематским грешкама, у различитим тренуцима времена, од дневних до сезонских и годишњих варијација [41]. Уз помоћ софтвера SARI могуће је извршити визуелизацију временских серија GNSS позиција, уклањање аутлејера и дисконтинуитета, уклапање модела и чување резултата. Постоје још додатне опције које омогућавају извлачење адекватних информација из временске серије, укључујући спектралну анализу са Lomb-Scargle периодограмом и таласном трансформацијом, филтрирање сингала помоћу Калмановог филтера и процјену временске корелације стохастичког шума резидуала. Програм је оријентисан на дневне/седмичне временске серије GPS положаја у формату NEU, али је могуће анализирати и друге серије података.

Математички модел који се може уклопити у серију укључује било коју комбинацију линеарног тренда плус прекиде, офсете, осцилације и остало. За то постоје двије методе: метод најмањих квадрата и Калманов филтер. Сам Калманов филтер је имплементиран на два различита начина: EKF и UKF. Обе имплементације Калман филтера укључују филтер унапријед (forward) и уназад (backward smoother) који је заснован на RTS (енгл. Rauch-Tung-Striebel) алгоритму, на основу којих се може добити прецизнија процјена стања.

Прије свега неопходно је преузети податке са сајта NGL и припремити их у одговарајућем формату, као што је приказано на слици 30.

1	2009.004800	3847008.048236	-932.501530	52.737514	0.000854	0.000703	0.002971
2	2009.007500	3847008.048648	-932.501495	52.736037	0.000860	0.000699	0.002921
3	2009.010300	3847008.049417	-932.499645	52.738306	0.000869	0.000708	0.002997
4	2009.013000	3847008.048585	-932.501823	52.734504	0.000861	0.000705	0.002988
5	2009.015700	3847008.048885	-932.502428	52.736968	0.000852	0.000705	0.002950
6	2009.018500	3847008.049417	-932.502155	52.732234	0.000848	0.000696	0.002929
7	2009.021200	3847008.047331	-932.503576	52.730457	0.000863	0.000723	0.003005
8	2009.024000	3847008.047771	-932.503544	52.732777	0.000870	0.000735	0.003071
9	2009.026700	3847008.049612	-932.501987	52.732999	0.000866	0.000714	0.003010
10	2009.029400	3847008.049266	-932.501960	52.736323	0.000864	0.000717	0.003049
11	2009.032200	3847008.049579	-932.510287	52.732082	0.000858	0.000716	0.003005
12	2009.034900	3847008.048041	-932.501881	52.740262	0.000861	0.000717	0.003015
13	2009.037600	3847008.049560	-932.504706	52.732469	0.000873	0.000718	0.003037
14	2009.040400	3847008.050009	-932.501649	52.745709	0.000862	0.000704	0.002966
15	2009.043100	3847008.046818	-932.505629	52.733604	0.000856	0.000709	0.002975
16	2009.045900	3847008.048085	-932.502653	52.741362	0.000856	0.000708	0.003001
17	2009.048600	3847008.048617	-932.503074	52.750119	0.000890	0.000727	0.003117
18	2009.051300	3847008.049617	-932.506335	52.742588	0.000890	0.000727	0.003119
19	2009.054100	3847008.050887	-932.505664	52.736045	0.000870	0.000710	0.003022
20	2009.056800	3847008.046936	-932.504376	52.743881	0.000862	0.000704	0.002998
21	2009.059500	3847008.048208	-932.503667	52.747921	0.000860	0.000705	0.002993
22	2009.062300	3847008.048650	-932.504036	52.742807	0.000897	0.000727	0.003131
23	2009.065000	3847008.047088	-932.505577	52.723945	0.000879	0.000720	0.003104
24	2009.067800	3847008.048179	-932.506461	52.729318	0.000859	0.000712	0.003009
25	2009.070500	3847008.049437	-932.507344	52.726916	0.000871	0.000719	0.003093
26	2009.073200	3847008.049622	-932.505065	52.743262	0.000854	0.000702	0.002969
27	2009.076000	3847008.047894	-932.504137	52.739371	0.000858	0.000706	0.002969
28	2009.078700	3847008.047992	-932.505203	52.743764	0.000871	0.000714	0.003067
29	2009.081500	3847008.047879	-932.504095	52.746174	0.000867	0.000719	0.003110
30	2009.084200	3847008.047944	-932.505885	52.746834	0.000860	0.000709	0.002989
31	2009.086900	3847008.047722	-932.505560	52.741140	0.000859	0.000705	0.002990
32	2009.089700	3847008.048002	-932.504291	52.742469	0.000861	0.000702	0.002970
33	2009.092400	3847008.048022	-932.504530	52.747477	0.000852	0.000710	0.002990
34	2009.095100	3847008.048483	-932.505386	52.742256	0.000859	0.000708	0.003023
35	2009.097900	3847008.049258	-932.504369	52.735934	0.000859	0.000709	0.002992
36	2009.100600	3847008.047948	-932.503717	52.740909	0.000861	0.000705	0.003016
37	2009.103400	3847008.047686	-932.506681	52.743804	0.000874	0.000727	0.003131
38	2009.106100	3847008.046899	-932.504873	52.737456	0.000862	0.000707	0.003029
39	2009.108800	3847008.048423	-932.502234	52.743883	0.000848	0.000700	0.002968
40	2009.111600	3847008.048162	-932.504068	52.738843	0.000848	0.000695	0.002914

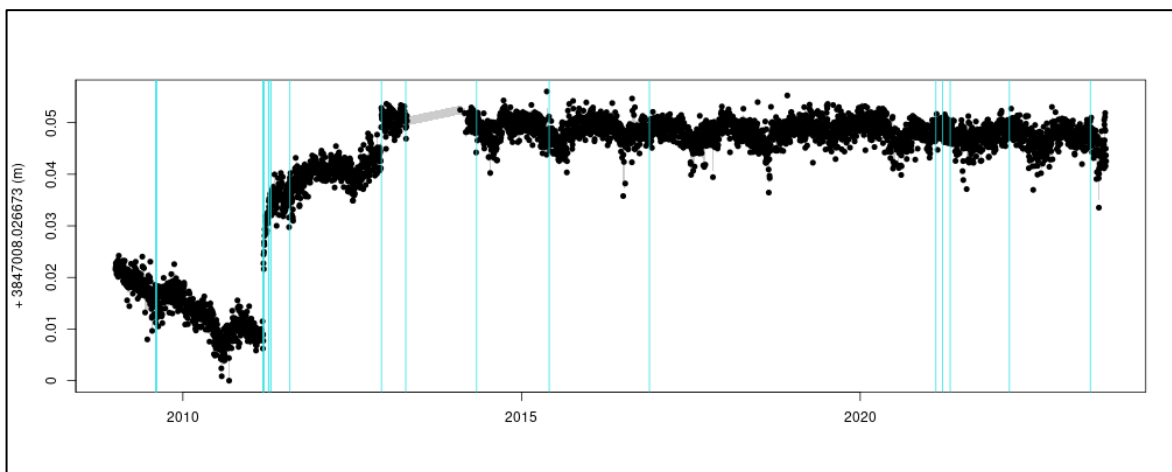
Слика 30. Улазни подаци у нец формату

Колоне представљене на слици 30 представљају редом:

1. 2009.004800 – децимални дио године,
2. 3847008.048236 – сјеверну компоненту изражену у [m],
3. -932.501530 – источну компоненту изражену у [m],
4. 52.737514 – вертикалну компоненту изражену у [m],
5. 0.000854 – стандардно одступање сјеверне компоненте изражено у [m],
6. 0.000703 – стандардно одступање источне компонентне изражено у [m],
7. 0.002971 – стандардно одступање вертикалне компоненте изражено у [m].

Након учитавања података неопходно је подесити временску резолуцију серије, као и линеарне димензије. Потом је могуће извршити визуелизацију временске

серије по компонентама у облику тачака, тачака и линија или само линија што се може видјети на слици 31.



Слика 31. Сјеверна компонента временске серије са станице I053

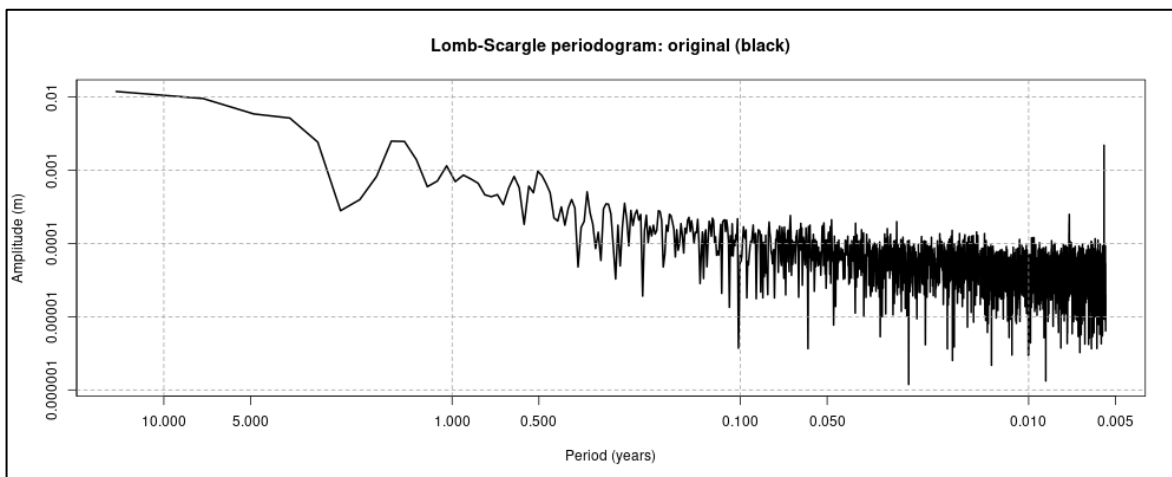
Вертикалне цијан линије представљају офсете који су преузети са веб сервиса Геодетске лабораторије Невада. Приказани офсети су посљедица сеизмичке активности, као и промјене опреме на самим станицама.

Након визуелизације временске серије, добијамо информације о броју тачака, односно опажања у серији, дужини серије, њеном распону, периоду узорковања и комплетности серије. Наведени подаци о временској серији за станицу I053 су приказани у табели 3.

Табела 3. Подаци о временској серији за станицу I053

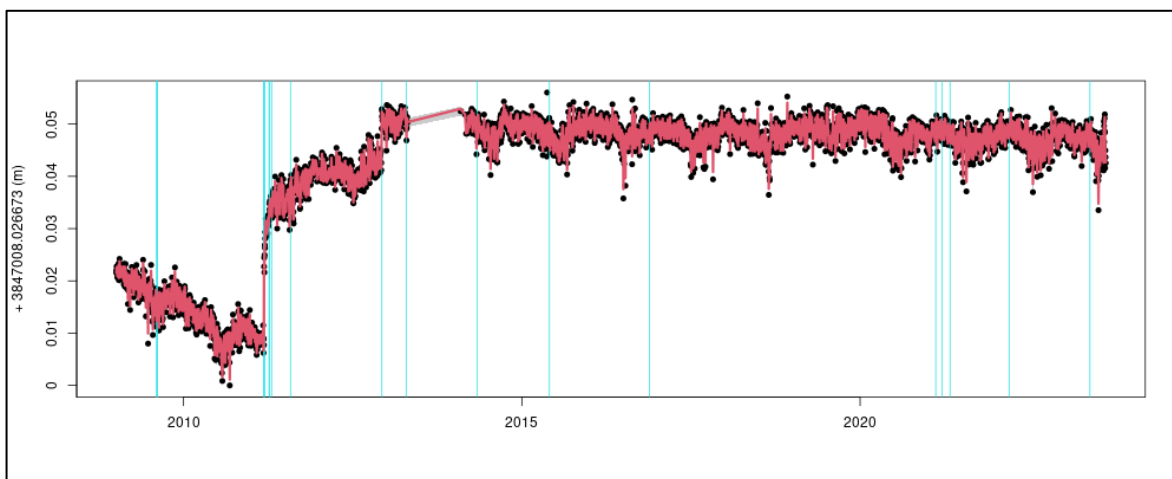
Подаци о временској серији	Вриједности
Number of points	4978
Series length	14.6256 years
Series range	2009.0048 - 2023.6304
Series sampling	0.0027 years
Series completeness	91.9 %

Потом је неопходно извршити фитовање модела методом најмањих квадрата. У овом поступку су коришћене линеарна и синусна функција. Линеарном функцијом се врши моделовање тренда временске серије, док се синусном моделују периодичне варијације које настају услед различитих сезонских промјена. Сам период синусне функције је могуће процијенити на основу Lomb-Scargle периодограма гдје су приказане амплитуде у функцији периода године (слика 32). На слици можемо уочити изражену амплитуду између петогодишњег и једногодишњег периода, према томе у моделовању сјеверне компоненте неопходно је укључити синусну функцију.



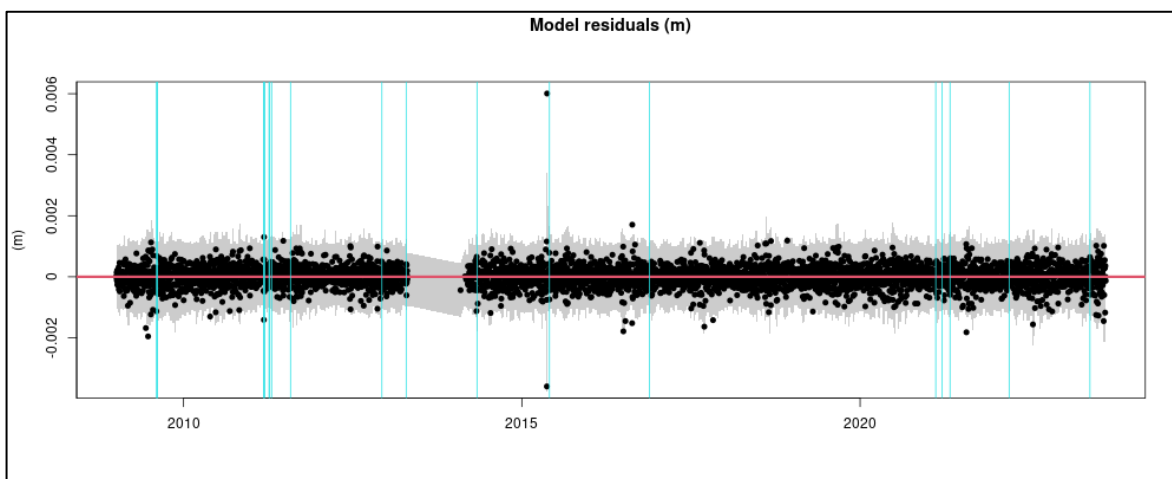
Слика 32. Периодограм сјеверне компоненте временске серије I053

Након извршеног моделовања методом најмањих квадрата, прелази се на примјену Калман филтера како би се временска серија што квалитетније моделовала и процјенила брзина станице са што већом прецизношћу. Приликом употребе Калмановог филтера неопходно је дефинисати шум мјерења и а приори стање свих параметара који се процјењују. Квалитет Калмановог филтера зависи управо од претпостављених а приори вриједности до којих се долази на основу података временске серије. Уколико је извршено моделовање методом најмањих квадрата, процјене одређених параметара послужиће као а приори вриједности параметара стања система Калмановог филтера. Након покретања филтера добија се резултат приказан на слици 33.

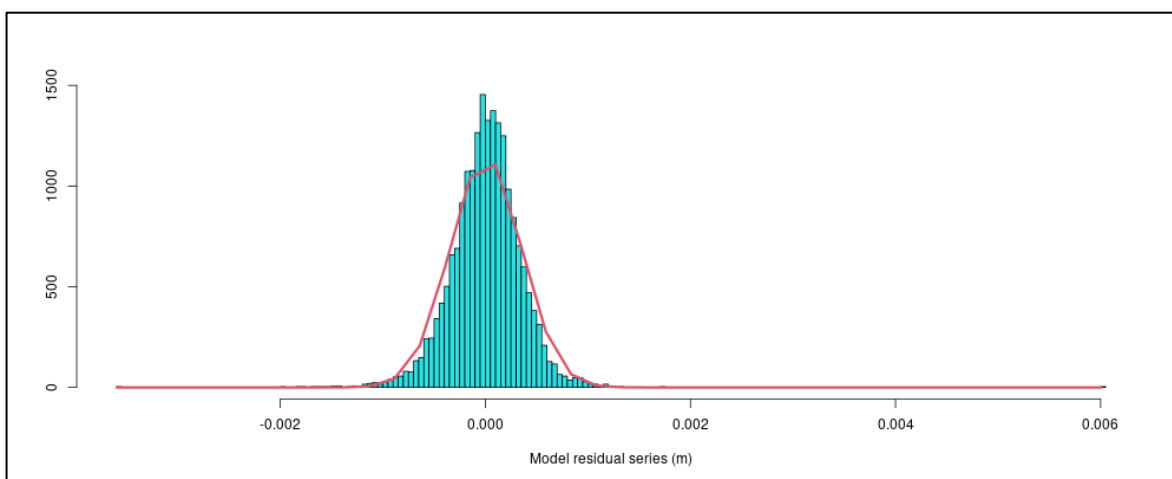


Слика 33. Моделовање сјеверне компоненте станице I053 примјеном Калмановог филтера

Такође, користан је приказ резидуала у односу на извршено моделовање (слика 34), као и хистограм резидуала (слика 35). На основу њих може се видјети да ли резидуали слиједе нормалну расподелу, односно да ли је моделовање извршено адекватно.



Слика 34. Модел резидуала за сјеверну компоненту станице I053



Слика 35. Хистограм резидуала сјеверне компоненте станице I053

Моделоване компоненте временских серија GNSS станица налазе се у прилогу 1, модели резидуала представљени су у прилогу 2, док се у прилогу 3 налазе хистограми резидуала.

Излазни резултат моделовања налази се у оквиру txt датотеке која садржи све информације о процјењеном моделу што је приказано на слици 36.

```

I053.neu_1 - Notepad
File Edit Format View Help
# SARI septiembre 2023 run on 2023-09-18 08:42:07 Etc/UTC
# Original series: I053.neu
# Coordinate component: North component
# Series units: (years) (m) (m/year)
# Model UKF: Model = Intercept + Rate*dx + S1*sin(2*pi*(x-2016.48220385697)*1) + C1*cos(2*pi*(x-2016.48220385697)*1)
# Parameter: Intercept = 3847008.06831521 +/- 0.00762006547297703
# Parameter: Rate = 0.00148825788142591 +/- 0.0191860711486687
# Parameter: S1 = -0.000891083985221987 +/- 0.0110348780521083
# Parameter: C1 = -0.000640704535592351 +/- 0.0111543736517884
# A priori: Intercept = 3847008.048236 +/- 0.0000291826164393768
# A priori: Rate = -0.00631489368943572 +/- 0.000649220949469639
# A priori: S1 = 0.00120826733524512 +/- 0.00060413366762256
# A priori: C1 = 0.00120826733524512 +/- 0.00060413366762256
# Process noise: Intercept = 0
# Process noise: Rate = 0.0024813
# Process noise: S1 = 0.0024813
# Process noise: C1 = 0.0024813
# Measurement noise: 0.000876509843310567 (m)

```

Слика 36. Излазни резултати моделовања

Описаним поступком, извршена је анализа временских серија са четири наведене GNSS станице. Добијене вриједности хоризонталних и вертикалних брзина представљене су у табели 4.

Табела 4. Процијењене вриједности брзина GNSS станица

Станице	Брзине положаја станица		
	N [mm/год.]	E [mm/год.]	Up [mm/год.]
J549	-111.41	317.13	12.49
J191	-70.74	165.61	-1.84
I053	1.49	4.26	1.57
J645	-5.94	33.12	-4.65

Интензитет резултантног вектора помјерања GNSS станица приказан је у табели 5, док се графички приказ хоризонталних брзина налази у прилогу 4. Вертикалне брзине представљене су у прилогу 5.

Табела 5. Интензитет резултантног вектора помјерања

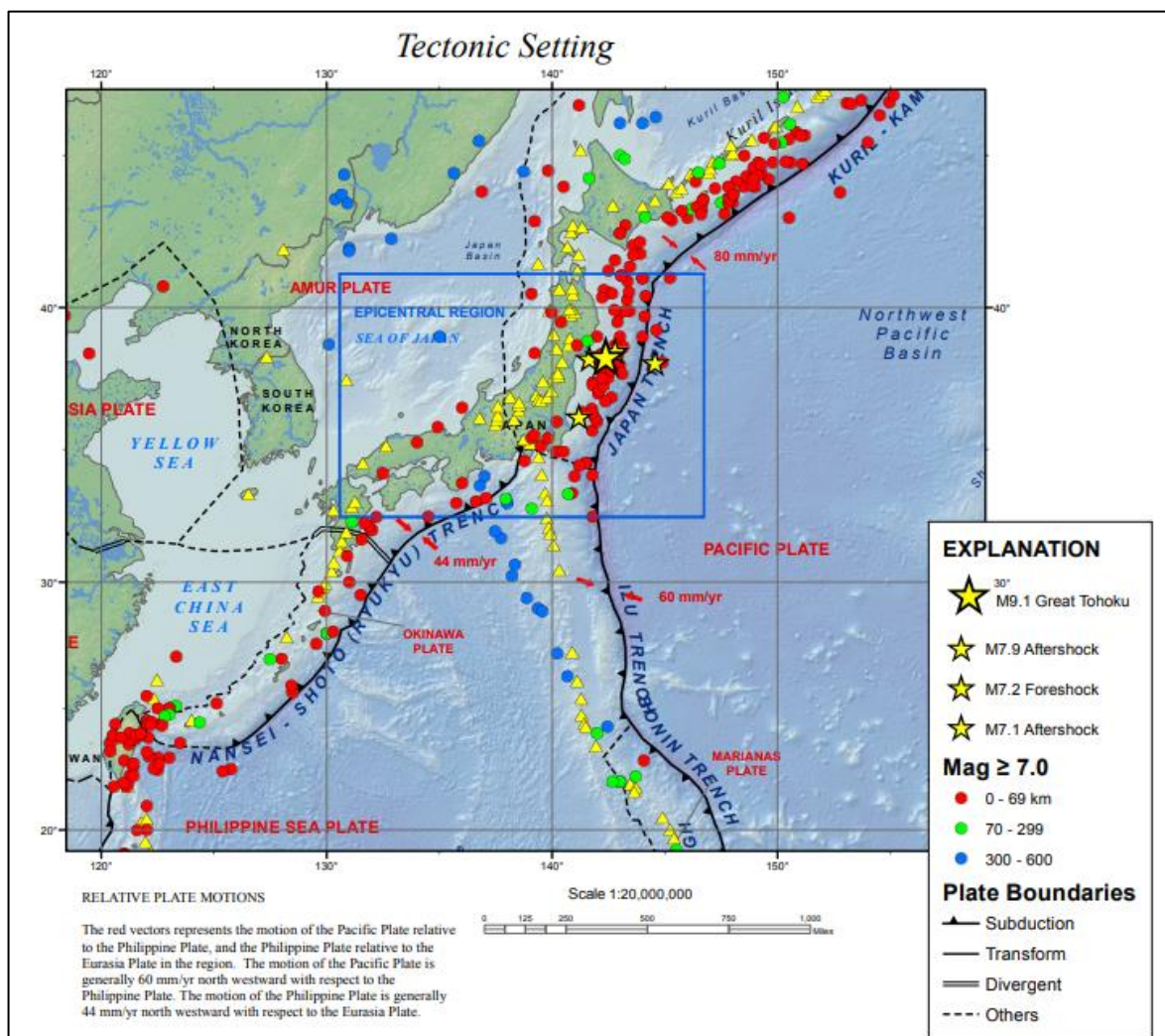
Станице	Интензитет резултантног вектора помјерања [mm/год.]
J549	336.13
J191	180.08
I053	4.51
J645	33.65

7.4. Анализа добијених резултата

На основу добијених резултата извршена је анализа хоризонталних и вертикалних брзина, као и најочљивијег офсета који је примјетан у свим временским серијама, а који је настао као посљедица разорног земљотреса Тохоку 11. марта 2011. године.

Земљотрес се догодио у близини сјевероисточне обале острва Хоншу, на дубини око 25 km, при чему је магнитуда земљотреса износила 9.1 [46]. Земљотрес је настао као резултат плитког расједа приликом субдукције на граници између Пацифичке и Сјеверноамеричке плоче (слика 37). На овом простору, Пацифичка плоча се креће приближно према западу у односу на Сјеверноамеричку брзином од 83 mm/год и подвлачи се испод копненог дијела Јапана у јапанском рову.

Моделовање руптуре земљотреса показало је да се расјед помјерио чак 50-60 m [46]. Тохоку земљотресу претходила је серија земљотреса два дана прије главног удара, почевши од 9. марта земљотресом магнитуде 7.4. Такође, на овом простору од 1973. године је забиљежено девет земљотреса магнитуде преко 7.



Слика 37. Интеракција тектонских плоча која је резултирала Тохоку земљотресом [47]

На основу временских серија може се закључити да су офсети у функцији удаљености посматраних станица од епицентра земљотреса, а вриједности растојања су приказане у табели 6.

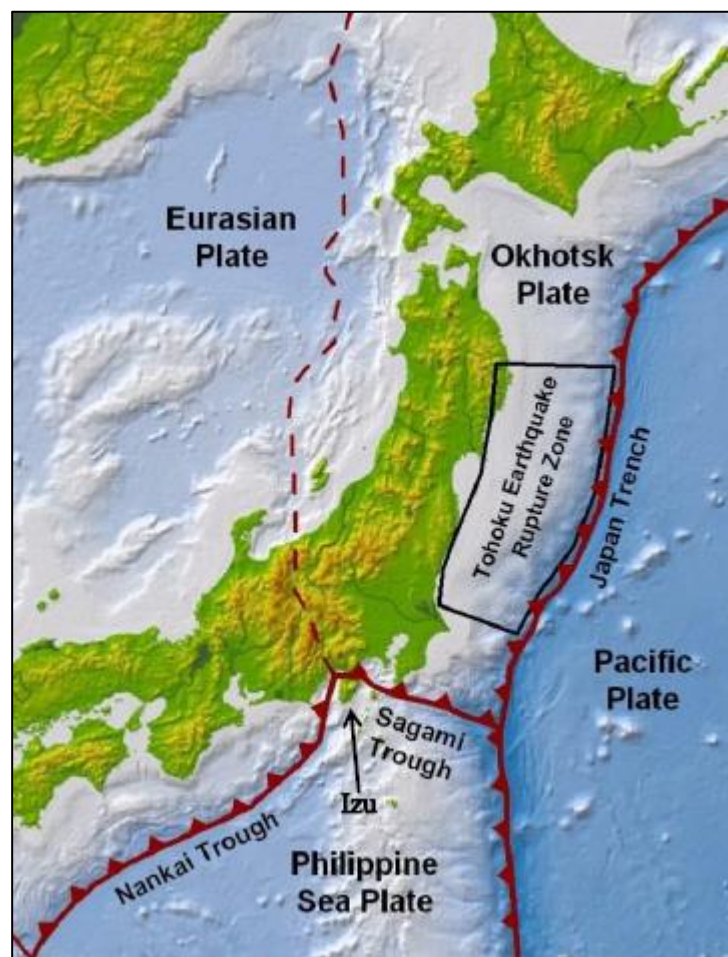
Табела 6. Удаљеност GNSS станица од епицентра Тохоку земљотреса

Станице	Удаљеност [km]
J549	102.1
J191	236.5
I053	496.7
J645	745.4

Посматрајући временске серије GNSS станица, види се да су управо највећи офсети заступљени у временској серији GNSS станице J549, која је и најближа епицентру земљотреса. У периоду земљотреса, забљежена су помјерања по сјеверној компоненти од приближно 1.3 m, док по источној интензитет помјерања износи чак око 4.5 m. Такође, у вертикалној компоненти уочен је офсет чија је вриједност скоро 0.5 m. У временској серији станице J191 офсети су такође значајни, али ипак мањи у односу на станицу J549. Сагласно са претпостављеним очекивањима, офсети на GNSS станицама I053 и J645 су далеко мањи у односу на претходне двије станице, гдје у вертикалним компонентама скоро да и није било значајнијих помјерања.

Анализом хоризонталних брзина посматраних станица, може се уочити да су резултантни вектори станица J549 и J191 већи по интензитету у односу на друге двије станице. Такође, смјерови ових вектора се приближно поклапају и указују на покрете Сјеверноамеричког дијела тектонске плоче према југоистоку. Хоризонтална брзина станице J645 је прилично мањег интензитета у поређењу са претходне двије брзине, док смјер вектора такође указује на кретање у правцу југоистока. Највеће разлике приликом анализе резултантних вектора хоризонталног помјерања уочене су код станице I053. Интензитет вектора указује на значајно мања помјерања овог подручја, док се и смјер разликује у односу на претходне три станице. Посматрајући слику 38. може се претпоставити да су ове разлике проистекле из чињенице да се GNSS станица налази на острву Изу, које припада Филипинској тектонској плочи. Поред тога, може се уочити да се станица J645 налази на Евроазијској плочи, што поред удаљености од епицентра Тохоку земљотреса, представља вјероватно још један разлог споријег хоризонталног помјерања у односу на станице J549 и J191 које се налазе на Сјеверноамеричкој тектонској плочи.

У вертикалним брзинама се такође могу примјетити разлике по интензитету и смјеру. Опажањем вертикалних брзина уочено је спуштање западне обале острва Хоншу на којем се налазе GNSS станице J191 и J645, док станице J549 и I053 указују на издизање источне обале овог острва. Добијени резултати су сагласни са детектованом субдукцијом Пацифичке плоче под копнени дио Јапана, која је управо била узрок земљотреса Тохоку.



Слика 38. Положај полуострва Изу у односу на распоред тектонских плоча [48]

Поред претходно наведеног, код већине компонената анализираних временских серија GNSS станица у постсеизмичкој фази, запажена су кретања слична оним прије самог земљотреса. Такође, у појединим компонентама временских серија уочено је кретање којим се станице враћају у стање прије земљотреса као на примјер код вертикалне компоненте станице J549.

8. ЗАКЉУЧАК

GNSS технологија представља моћан алат за праћење и квантификовање деформација на површини Земљине коре. Напретком наведене технологије, односно развојем и других глобалних навигационих сателитских система поред GPS-а, омогућено је праћење деформација на глобалном нивоу. На почетку примјене GNSS мјерења, вршене су мјерне кампање које су организоване периодично у одређеним временским интервалима. Значајнији корак начињен је развојем континуираних GNSS мрежа за потребе геодинамичких истраживања. На основу континуираних GNSS мјерења долази се до процјене тродимензионалних координата станица на дневном нивоу кроз дужи временски период. Управо уређени низ процјењених положај GNSS станица у одређеном интервалу времена представља временску серију GNSS координата.

Временске серије се састоје од тродимензионалних координата станица (X, Y, Z) које су трансформисане у топоцентричне координате (N, E, U) ради једноставније интерпретације уочених помјерања на Земљиној површини. Праћењем промјене положаја координата станица у времену, долази се до вектора брзине помјерања GNSS станица, на основу чега се врши моделовање тектонских помјерања. Временске серије GNSS координата, поред тога што носе информације о геофизичким процесима, садрже и информације које су резултат грешака из различитих извора, које се појављују на дневном, сезонском или годишњем нивоу. Генерално, временске серије GNSS координата се могу представити као збир детерминистичког и стохастичког дијела. Детерминистички дио се састоји од линеарног тренда који се може објаснити као кретање тектонске плоче, и нелинеарних варијација које су често посљедица сезонских промјена. Елиминацијом детерминистичког дијела преостаје стохастички дио у облику шума. Једно од уочљивијих одступања у временској серији представљају офсети који могу настати као резултат земљотреса, али и промјене мјерне опреме, при чему у другом случају не представљају корисну информацију за геодинамичка истраживања. Ове чинећице доводе до потребе за адекватном анализом временских серија, како би се што квалитетније интерпретирале информације које су у њима садржане.

У оквиру мастер рада постављена је општа хипотеза која гласи: На основу анализе отворених података временских серија GNSS координата примјеном Калмановог филтера могу се моделовати тектонска помјерања на подручју Јапана.

У практичном дијелу рада извршена је анализа временских серија GNSS координата које су јавно доступне на сајту Геодетске лабораторије Неваде.

Приликом анализе кориштене су временске серије које садрже процјене координата на дневном нивоу. Инвертвал прикупљања података обухвата приближно период од почетка 2009. године до средине августа 2023. године. Примјеном Калман филтера извршена је процјена брзина посматраних GNSS станица, на основу којих је извршено моделовање тектонских помјерања на подручју Јапана.

Анализом процјењених брзина може се закључити да хоризонтална и вертикална кретања острва Хоншу нису хомогена. Посматрани резултати показују да су највећи интензитети брзина станица J549 и J191 које припадају Сјеверноамеричкој тектонској плочи и налазе се на сјеверном дијелу острва Хоншу. Вектори брзина указују да се кретање овог дијела острва одвија у југоисточном смјеру, чри чему су њихови интензитети на центиметарском нивоу. Сличан смјер, али мањи интензитет, има и резултантни вектор хоризонталне брзине станице J645. Најмањи интензитет помјерања уочен је код станице I053, при чему се и смјер кретања разликује од осталих станица и указује на помјерање према сјевероистоку. Претпоставља се да ова разлика произилази из чињенице што се станица I053 налази на полуострву Изу које припада Филипинској плочи. Интерпретацијом вертикалних брзина наведених GNSS станица примјеђено је спуштање западне обале острва Хоншу на којем су позициониране станице J191 и J645, док станице J549 и I053 показују издизање источне обале. Наведена вертикална помјерања су сагласна са уоченом субдукцијом Пацифичке плоче под копнени дио Јапана, што је 2011. године довело до разорног земљотреса Тохоку.

На основу добијеног модела тектонских помјерања на подручју Јапана може се потврдити општа хипотеза мастер рада.

Поред опште, у мастер раду је постављена и сљедећа алтернативна хипотеза: Примјеном Калмановог филтера на анализиране отворене податке временских серија GNSS координата, може се донијети закључак да постоји веза између тектонских помјерања на подручју Јапана и земљотреса, што указује на могућност кориштења овакве методологије у предвиђању земљотреса.

Подручје Јапана може се окарактерисати као изразито подложно сеизмичким активностима, а међу бројним земљотресима нису ријетки ни разорни попут Тохоку земљотреса. Већина ових земљотреса настаје као последица тектонске активности која је веома изражена на овом простору. Управо је и земљотрес Тохоку резултат субдукције Пацифичке плоче у односу на Сјеверноамеричку код јапанског рова. Посматрањем анализираних временских серија може се лако уочити појава офсета која је проузрокована између осталог и земљотресима. На основу наведеног, може

се закључити да земљотреси свакако остављају запажен траг у временским серијама координата добијених GNSS технологијом. Анализом офсета могу се извући значајни подаци о сложености земљотреса као и о постсеизмичким деформацијама. Посматрајући временске серије, највећи офсети су уочени код станице J549 која је и најближа епицентру земљотреса. Офсет интензитета приближно 4.5 m детектован је у источној компоненти ове станице, док у вертикалној вриједност офсета износи око 0.5 m. Према томе, интензитет офсета је сразмјеран растојању GNSS станице од епицентра земљотреса. У складу са тим, офсети на станицама I053 и J645 су далеко мањи у поређењу са друге двије станице.

У складу са претходно наведеним, може се јасно успоставити веза између тектонских помјерања и сеизмичких активности. Даље, временске серије дају детаљан увид у цијели сеизмички циклус. Претпоставља се да ће у будућности бити уложено много труда за разумијевање сеизмичких процеса као и феномена који указују на могућу појаву земљотреса. Сразмјерно развоју технологије и научних достигнућа, може се очекивати напредак у побољшању поузданости система за рано упозорење на земљотресе, који би несумњиво смањили број жртава ове природне катастрофе.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Wheeler, J., Cheadle, M. (2014). Geophysics, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.
- [2] Condie, K. C. (2013). Plate tectonics & crustal evolution. Elsevier.
- [3] Lowrie, W., & Fichtner, A. (2020). Fundamentals of geophysics. Cambridge university press.
- [4] Wolfgang, F., Martin, M., & Ronald, B. (2011). Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building.
- [5] Angermann, D., Pail, R., Seitz, F., & Hugentobler, U. (2022). Mission Earth: Geodynamics and Climate Change Observed Through Satellite Geodesy. Springer Nature.
- [6] Ел. извор:
<https://www.nps.gov/subjects/geology/plate-tectonics-evidence-of-plate-motions.htm>
- [7] Ел. извор: <https://collegedunia.com/exams/plate-tectonics-physics-articleid-2217>
- [8] Сушић, З. (2014). Геодинамичка анализа померања земљине коре регионалног карактера. Универзитет у Новом Саду.
- [9] Summerfield, M. A. (2014). Global geomorphology. Routledge.
- [10] Ел. извор:
<https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismic-waves#.Y6RQb3bMKM8>
- [11] Туцикешић, С. С. (2020). Моделовање тектонских помјерања и квантификације деформација земљине коре коришћењем GNSS технологије. Универзитет у Београду.
- [12] Jackson, J., & Molnar, P. (1990). Active faulting and block rotations in the western Transverse Ranges, California. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95(B13), 22073-22087.
- [13] Working Group on California Earthquake Probabilities, WGCEP (1995):
www.WGCEP.org
- [14] Jean, M., N. (2019): On going motion in the Alps Mediterranean. Berlin. Geoazur, University of Côte d’Azur, CNRS INSU, IRD, OCA, France & Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, France.
- [15] Nikolaidis, R. M., Bock, Y., de Jonge, P. J., Shearer, P., Agnew, D. C., & Van Domselaar, M. (2001). Seismic wave observations with the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B10), 21897-21916.

- [16] Larson, K. M., Bodin, P., & Gombert, J. (2003). Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake. *Science*, 300(5624), 1421-1424.
- [17] Bock, Y., Agnew, D. C., Fang, P., Genrich, J. F., Hager, B. H., Herring, T. A., ... & Wyatt, F. K. (1993). Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements. *Nature*, 361(6410), 337-340.
- [18] Blewitt, G., Heflin, M. B., Hurst, K. J., Jefferson, D. C., Webb, F. H., & Zumberge, J. F. (1993). Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence. *Nature*, 361(6410), 340-342.
- [19] Crowell, B. W., Bock, Y., & Squibb, M. B. (2009). Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks. *Seismological Research Letters*, 80(5), 772-782.
- [20] Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (Eds.). (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems* (Vol. 10, pp. 978-3). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [21] Благојевић, Д. (2014). *Увод у Сателитску геодезију*. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду.
- [22] Ел. извор: <https://www.gps.gov/systems/gnss/>
- [23] Ел. извор:
https://www.researchgate.net/figure/BeiDou-GNSS-constellation-and-orbital-parameters_fig1_333336469
- [24] Ел. извор:
https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Walker-constellation-for-GALILEO_fig2_340881168
- [25] Grewal, M. S., Andrews, A. P., & Bartone, C. G. (2020). *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- [26] Montillet, J. P. (2008). *Precise positioning in Urban canyons: applied to the localisation of buried assets* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- [27] Ел. извор: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- [28] Wells, D., & Beck, N. (1986). *Guide to GPS positioning*. (No Title).
- [29] Karaim, M. O., Karamat, T. B., Noureldin, A., Tamazin, M., & Atia, M. M. (2013, September). Real-time cycle-slip detection and correction for land vehicle navigation using inertial aiding. In *Proceedings of the 26th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2013)* (pp. 1290-1298).

- [30] Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., & Rothacher, M. (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*, 81, 781-798.
- [31] Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7), ETG-9.
- [32] Ковачић, З. Ј. (1995). Анализа временских серија. Економски факултет.
- [33] Calais, E. (2009). GPS noise, noise models and sources.
- [34] Ел. извор:
<https://www.gaussianwaves.com/2013/11/simulation-and-analysis-of-white-noise-in-matlab/>
- [35] Langbein, J. (2012). Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker–random-walk models. *Journal of Geodesy*, 86(9), 775-783.
- [36] Wu, D., Yan, H., & Shen, Y. (2017). TSAlyzer, a GNSS time series analysis software. *Gps Solutions*, 21, 1389-1394.
- [37] Barba, P., Rosado, B., Ramírez-Zelaya, J., & Berrocoso, M. (2021). Comparative analysis of statistical and analytical techniques for the study of GNSS geodetic time series. *Engineering Proceedings*, 5(1), 21.
- [38] Çelik, C. T. (1998). Crustal deformation monitoring by the Kalman filter method (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- [39] Gourine, B., Niati, A., Benyahia, A., & Brahimi, M. (2015). Analysis of GPS coordinates time series by Kalman filter. *FIG Working Week 2015 From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World*, 17-21.
- [40] Baillieul, J., & Samad, T. (Eds.). (2021). *Encyclopedia of systems and control*. Cham: Springer International Publishing.
- [41] Santamaría-Gómez, A. (2019). SARI: interactive GNSS position time series analysis software. *GPS solutions*, 23(2), 52.
- [42] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401-422.
- [43] Ел. извор: <https://www.nippon.com/en/features/h00234/>
- [44] Ел. извор: <http://geodesy.unr.edu/>
- [45] Blewitt, G., & Hammond, W. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99.

- [46] Hayes, G. P., Meyers, E. K., Dewey, J. W., Briggs, R. W., Earle, P. S., Benz, H. M., ... & Furlong, K. P. (2017). Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015 (No. 2016-1192). US Geological Survey.
- [47] Ел. извор: <https://www.usgs.gov/>
- [48] Apel, T., Williams, C., & Grossi, P. (2012). The M9. 0 Tohoku, Japan Earthquake: Short-Term Changes in Seismic Risk. Risk Management Solutions (RMS) Inc. Special Report.

10. СПИСАК ПРИЛОГА

Прилог 1. Моделоване компоненте временских серија GNSS координата

Прилог 2. Модели резидуала

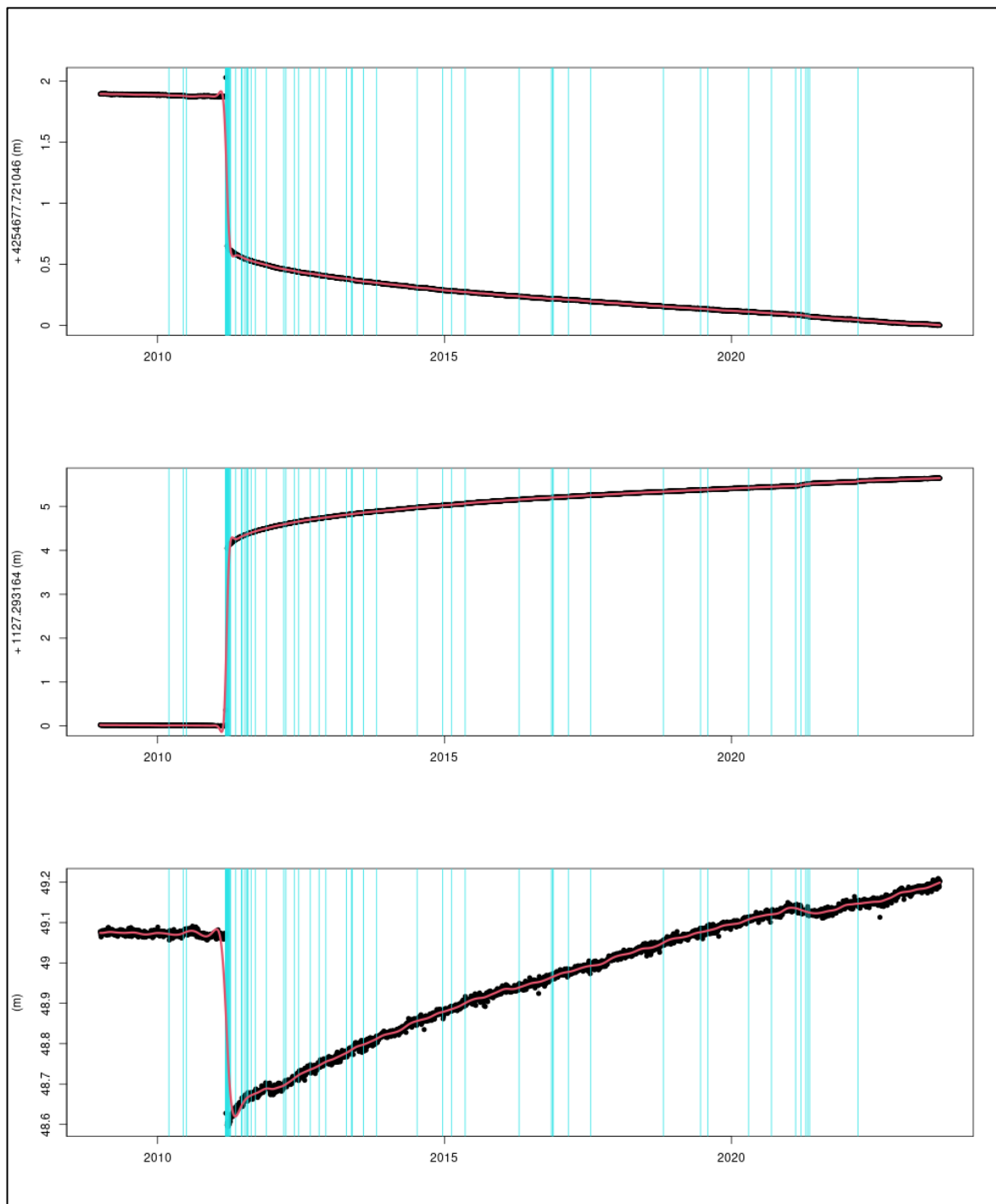
Прилог 3. Хистограм резидуала

Прилог 4. Хоризонталне брзине GNSS станица

Прилог 5. Вертикалне брзине GNSS станица

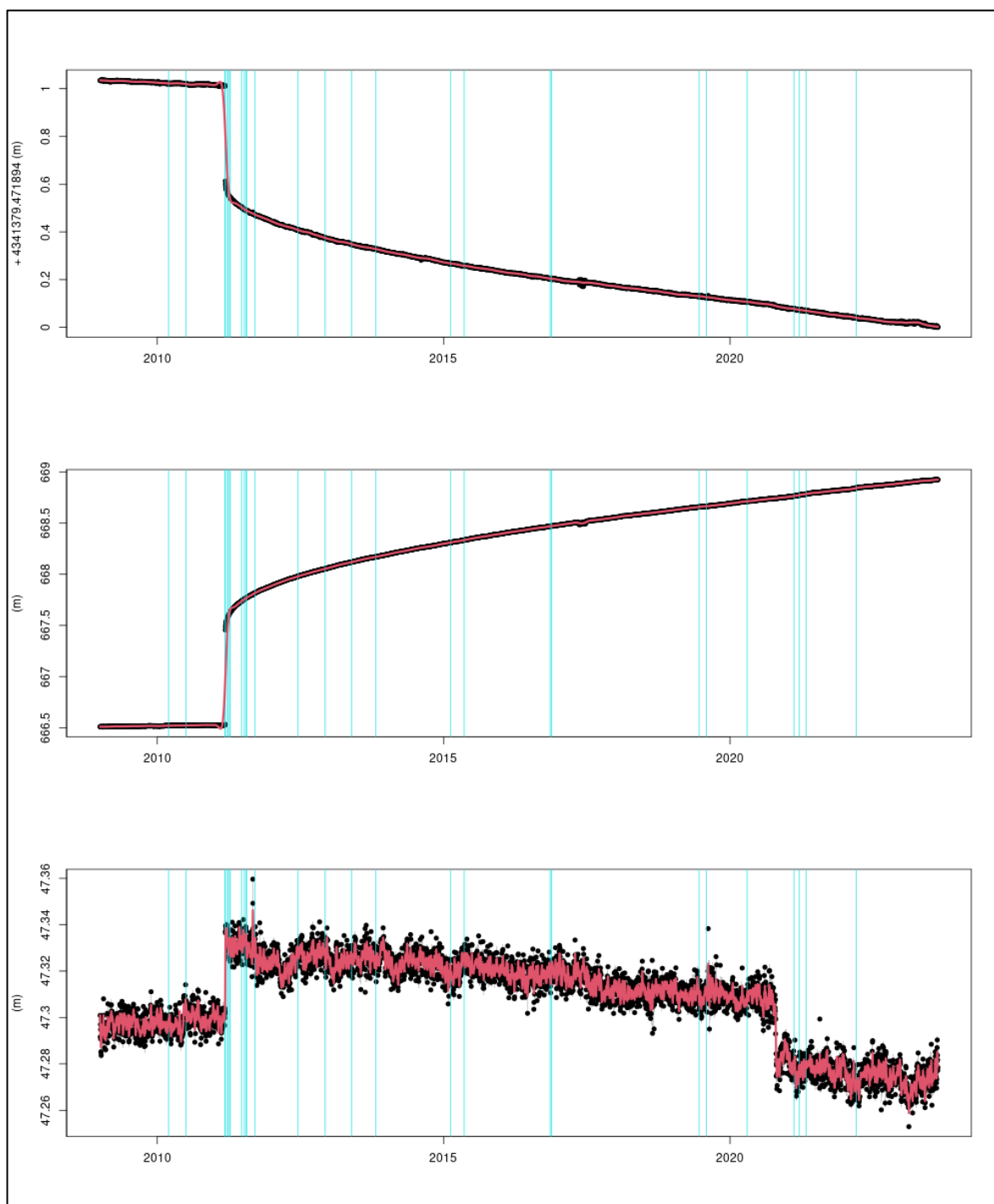
ПРИЛОГ 1

Моделоване компоненте временске серије GNSS станице J549 (N, E, U)



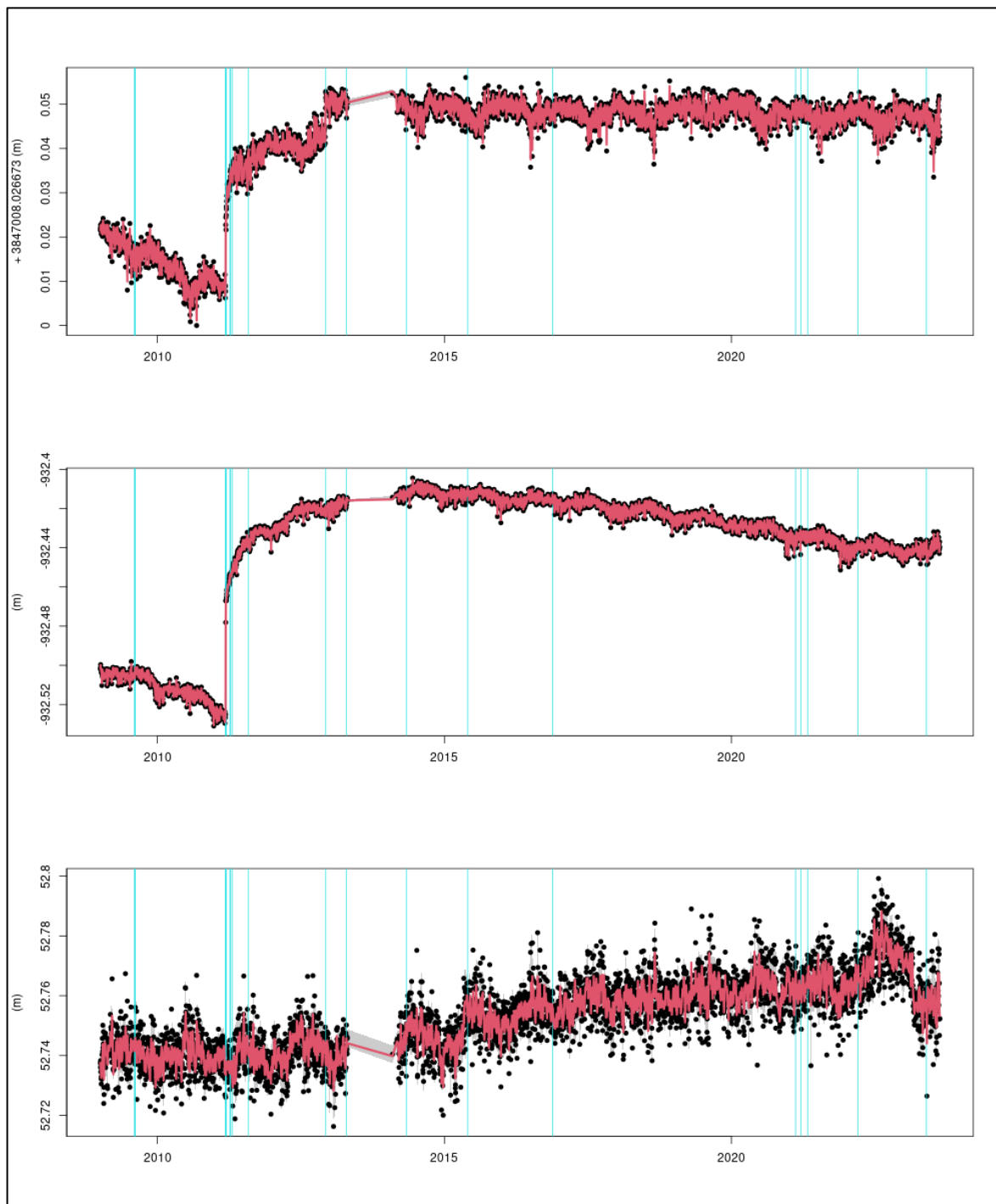
ПРИЛОГ 1

Моделоване компоненте временске серије GNSS станице J191 (N, E, U)



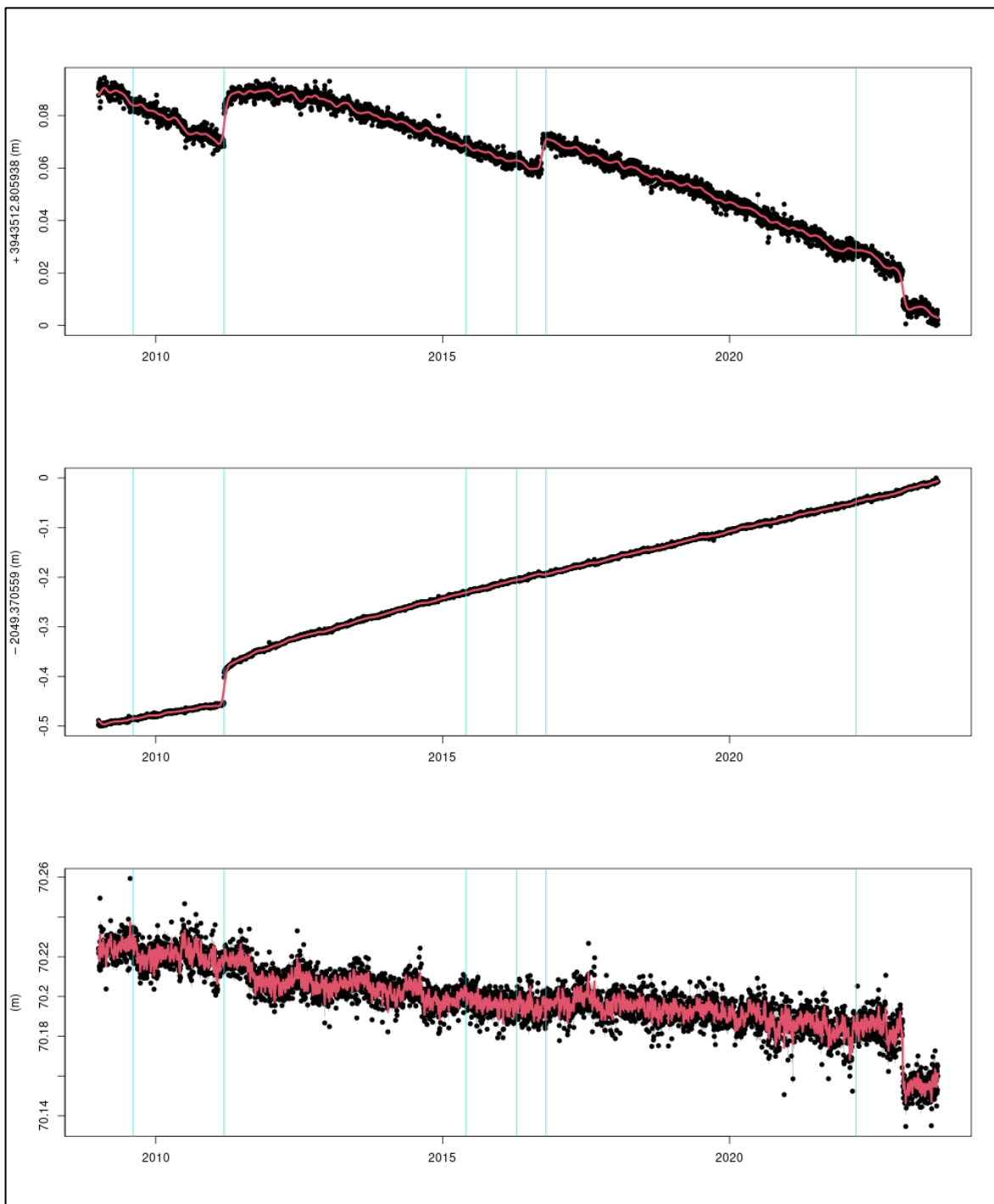
ПРИЛОГ 1

Моделоване компоненте временске серије GNSS станице I053 (N, E, U)



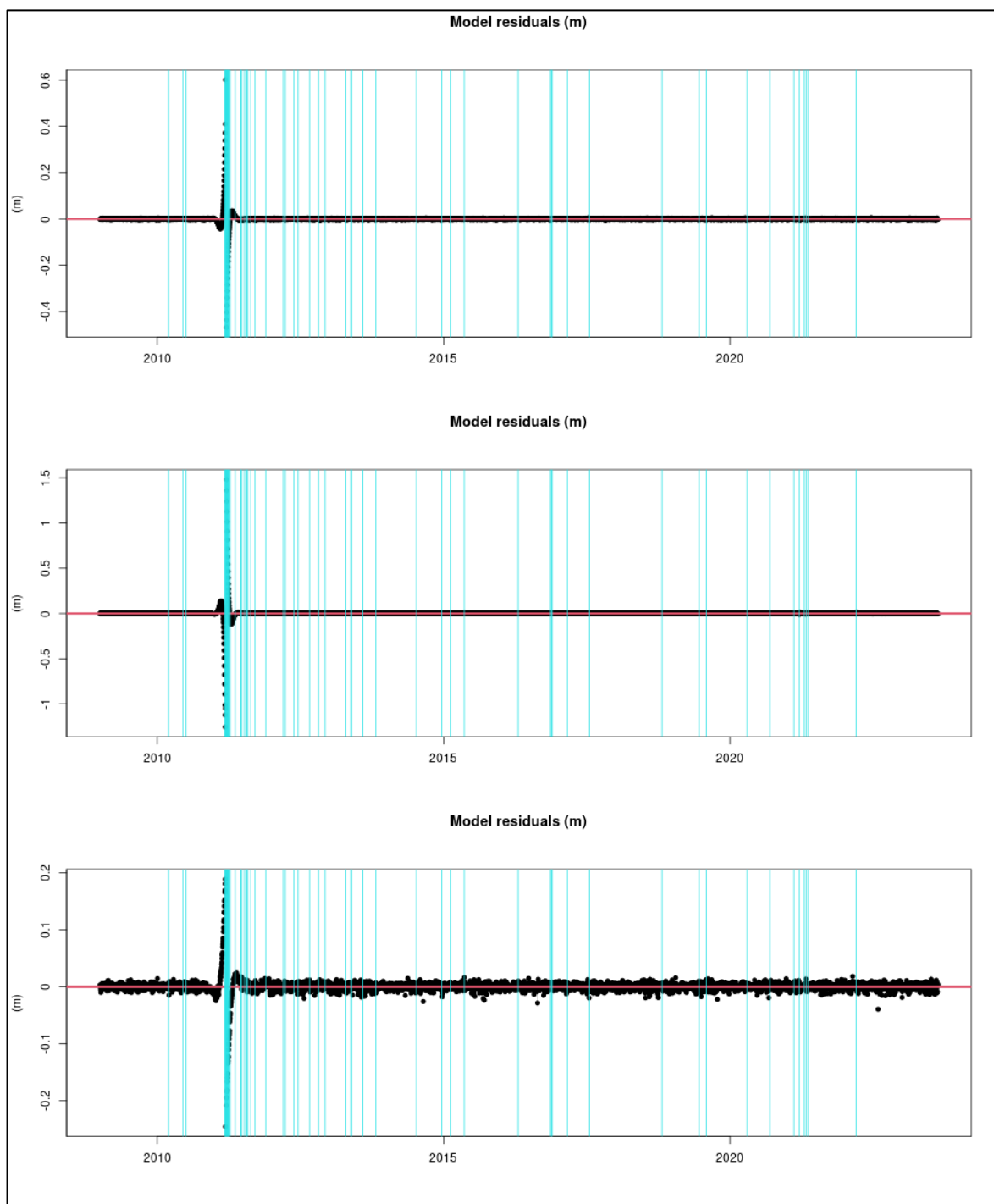
ПРИЛОГ 1

Моделоване компоненте временске серије GNSS станице J645 (N, E, U)



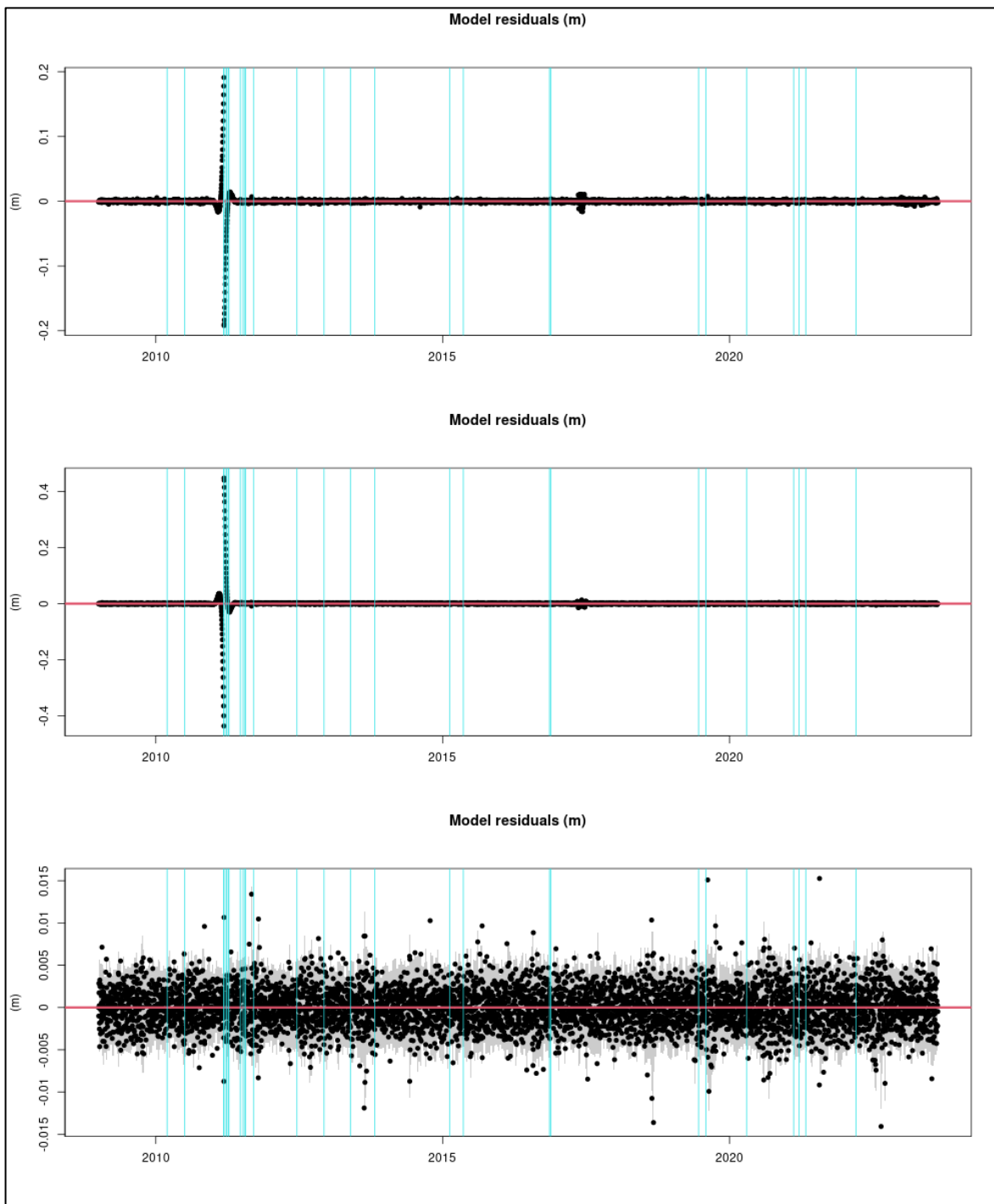
ПРИЛОГ 2

Модел резидуала временске серије GNSS станице J549 (N, E, U)



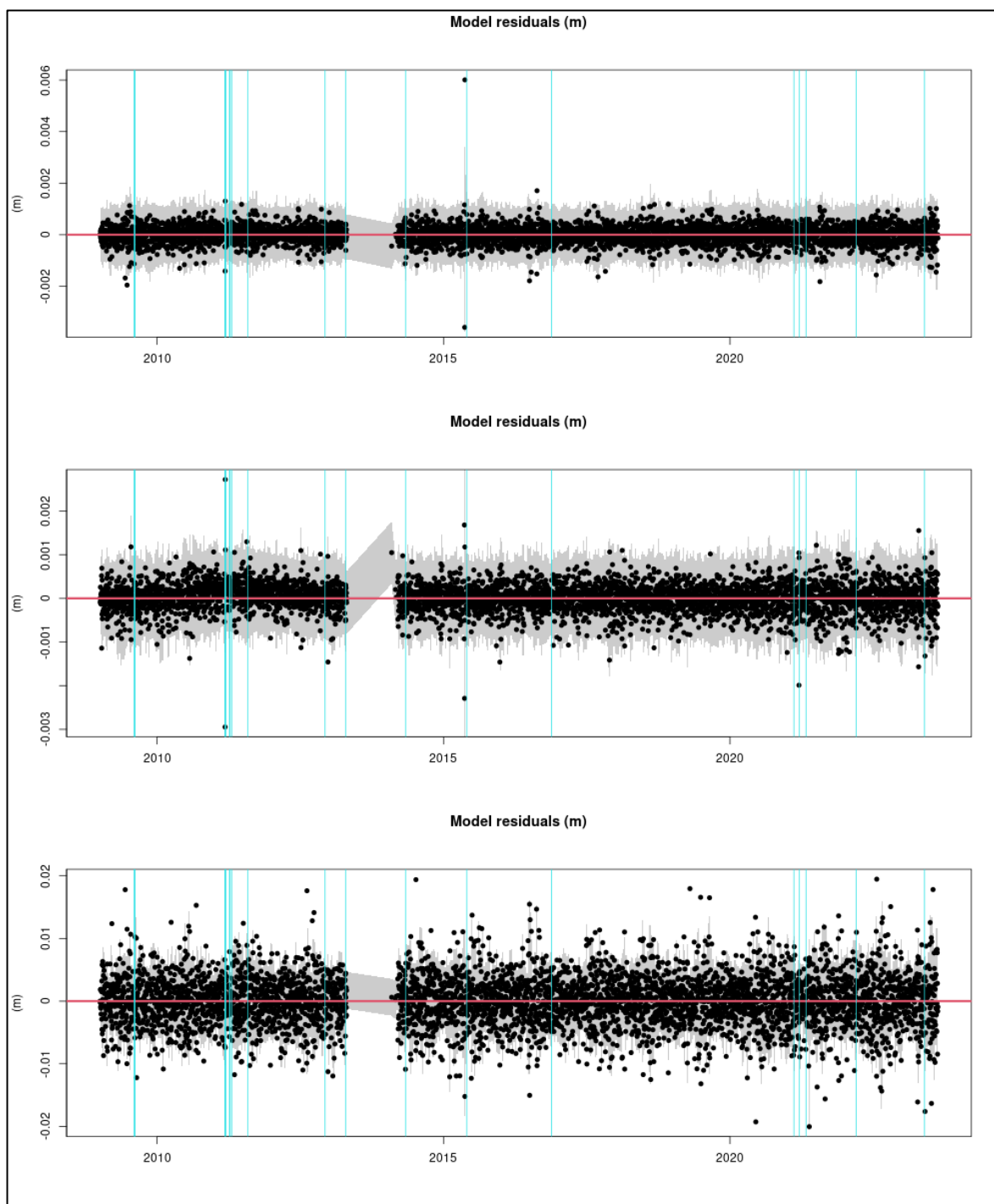
ПРИЛОГ 2

Модел резидуала временске серије GNSS станице J191 (N, E, U)



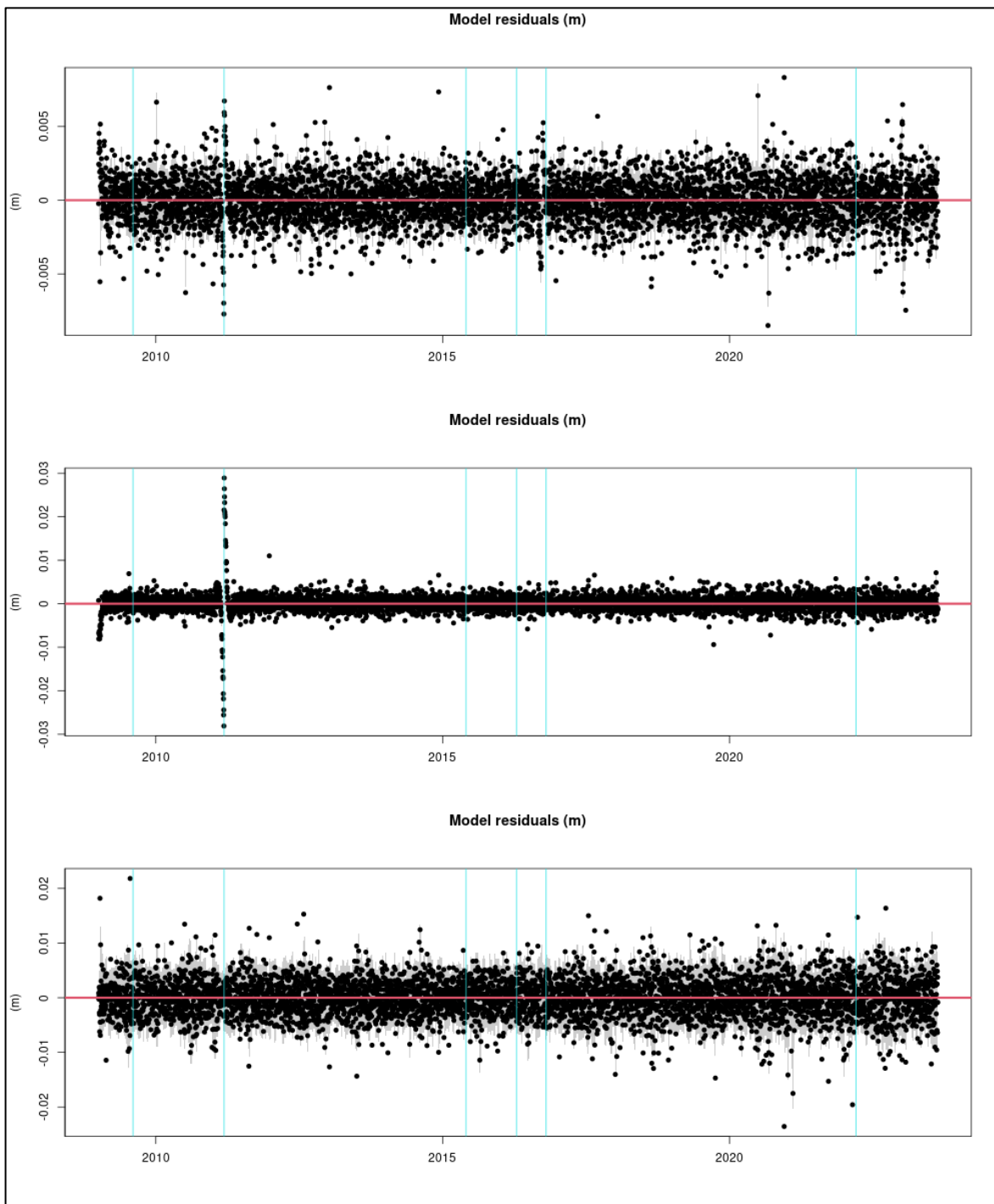
ПРИЛОГ 2

Модел резидуала временске серије GNSS станице I053 (N, E, U)



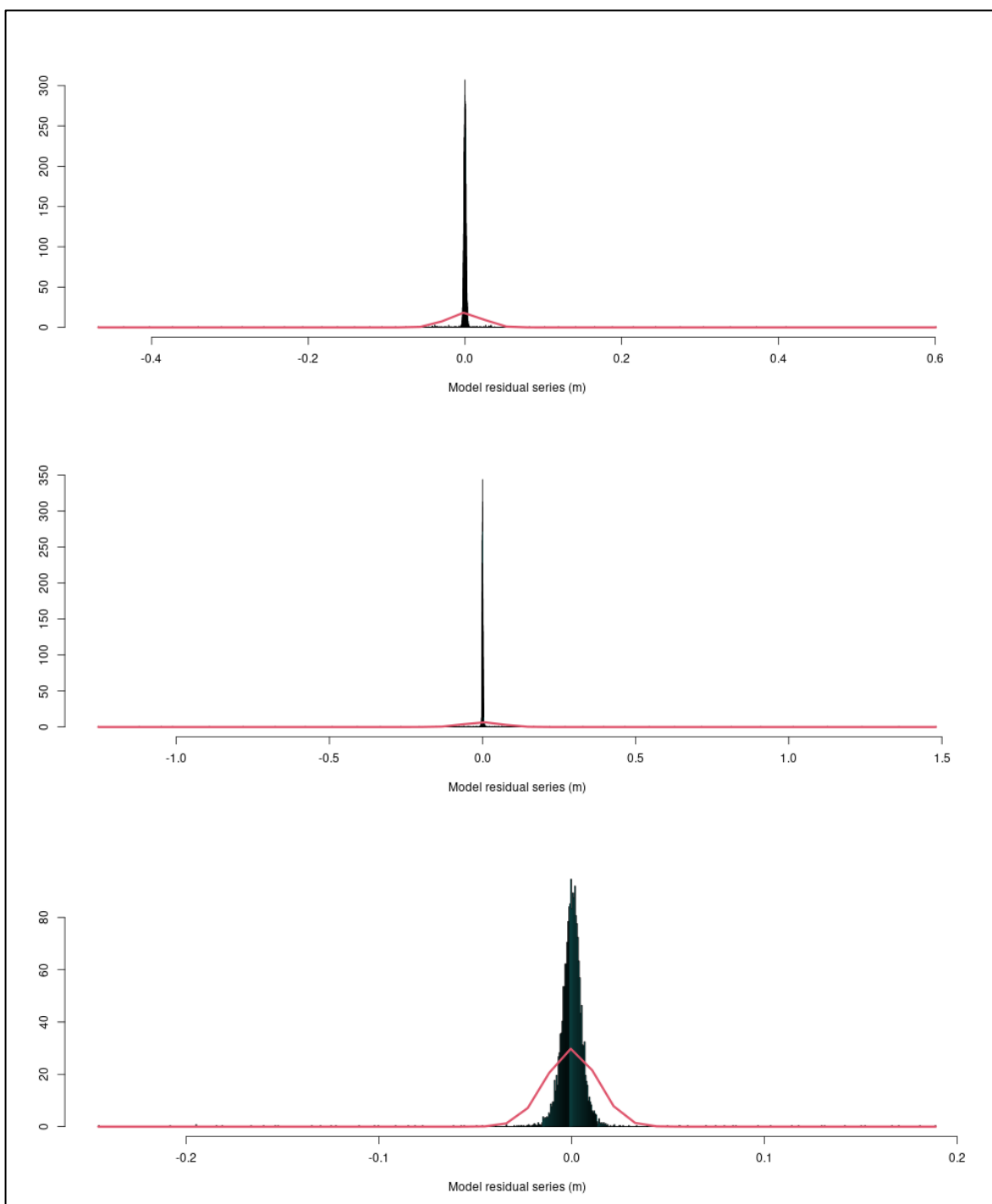
ПРИЛОГ 2

Модел резидуала временске серије GNSS станице J645 (N, E, U)



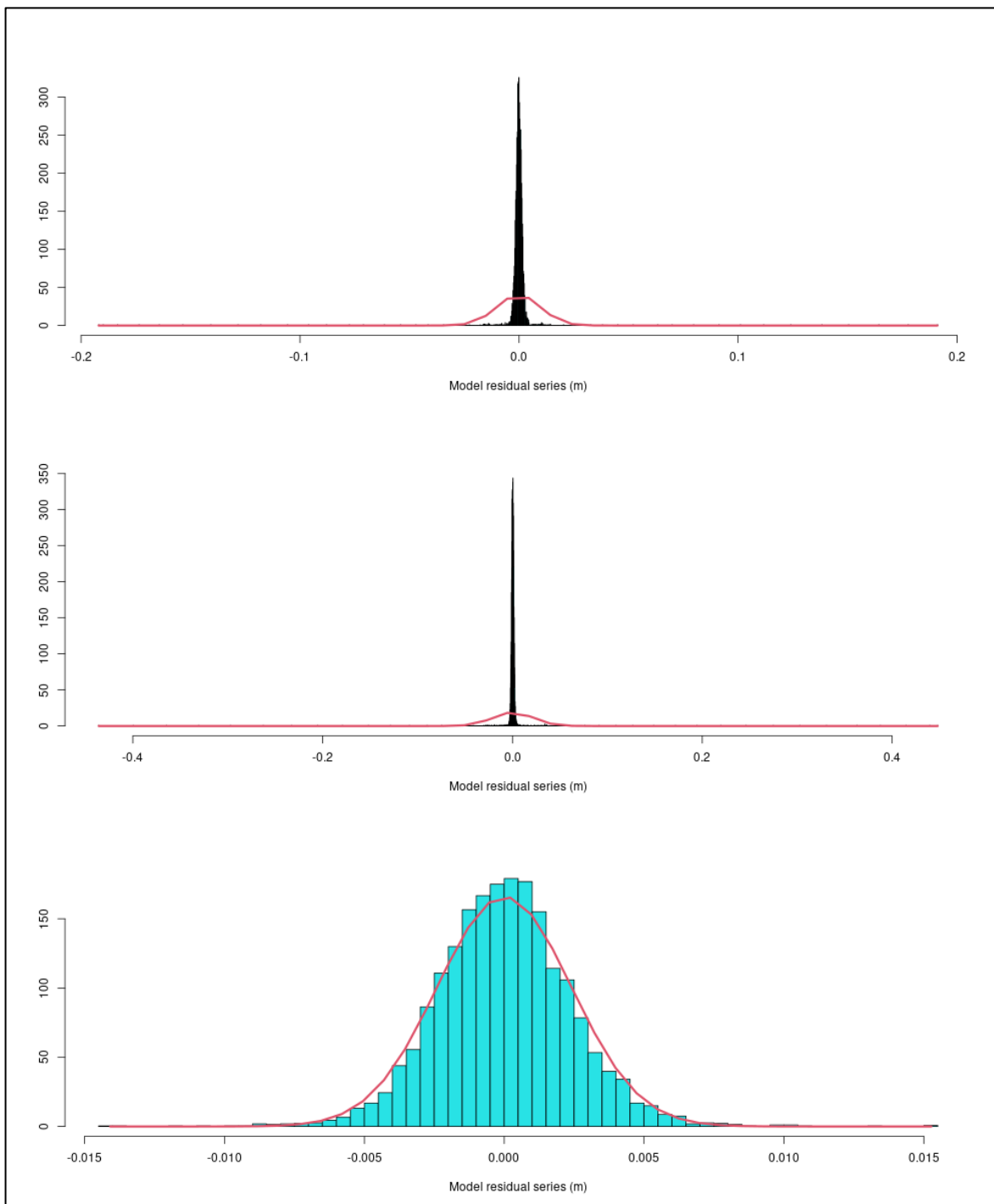
ПРИЛОГ 3

Хистограм резидуала временске серије GNSS станице J549 (N, E, U)



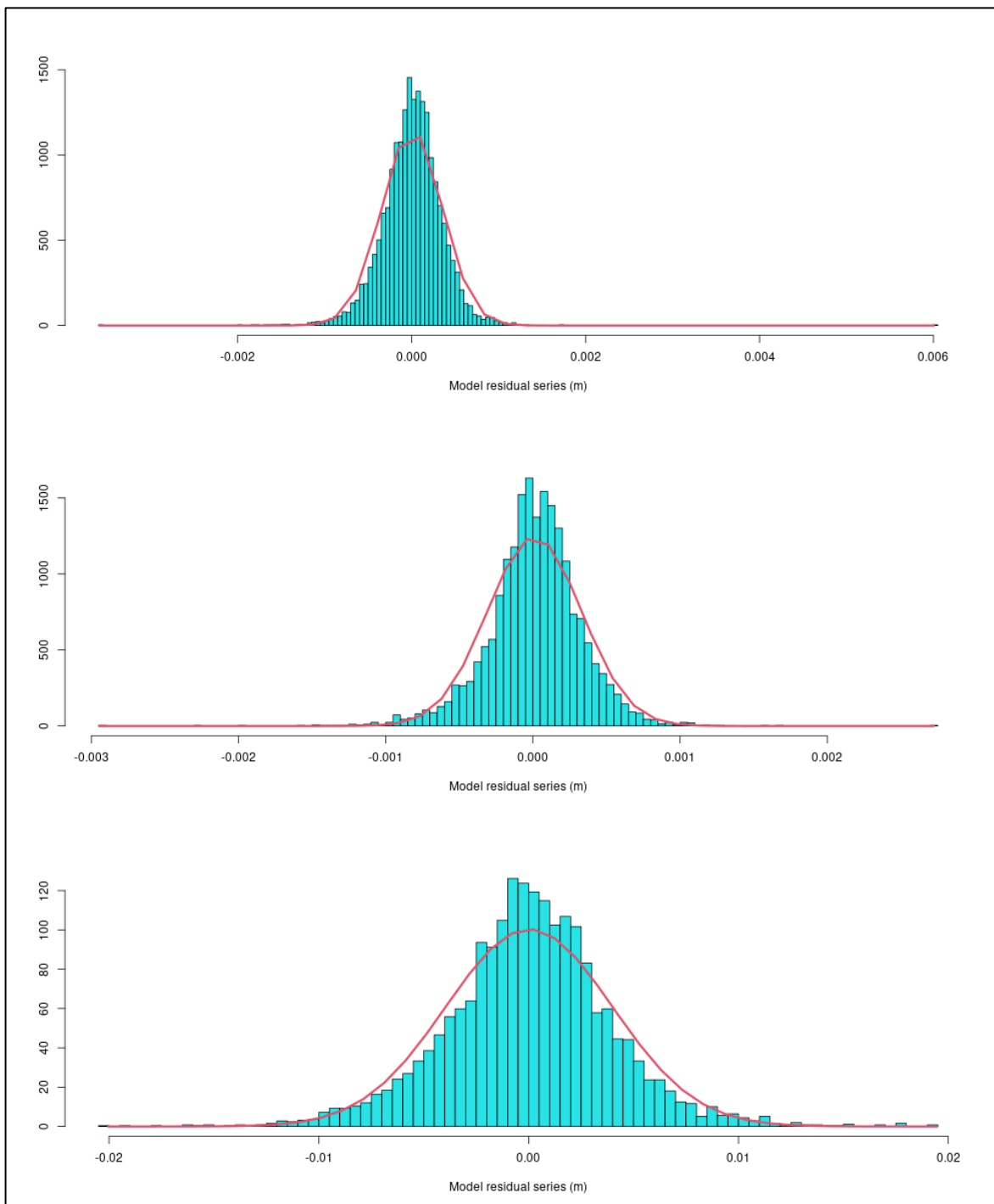
ПРИЛОГ 3

Хистограм резидуала временске серије GNSS станице J191 (N, E, U)



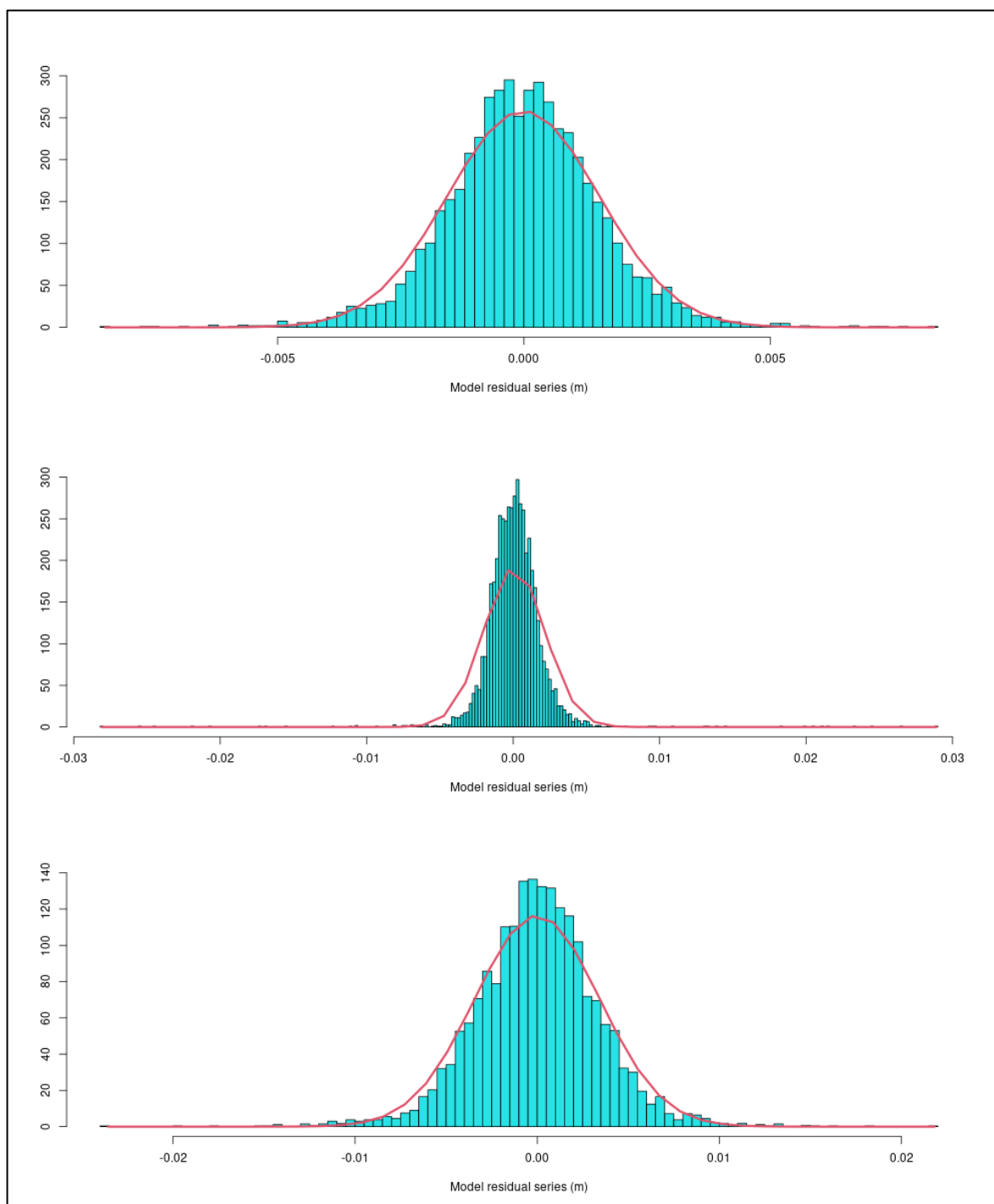
ПРИЛОГ 3

Хистограм резидуала временске серије GNSS станице I053 (N, E, U)



ПРИЛОГ 3

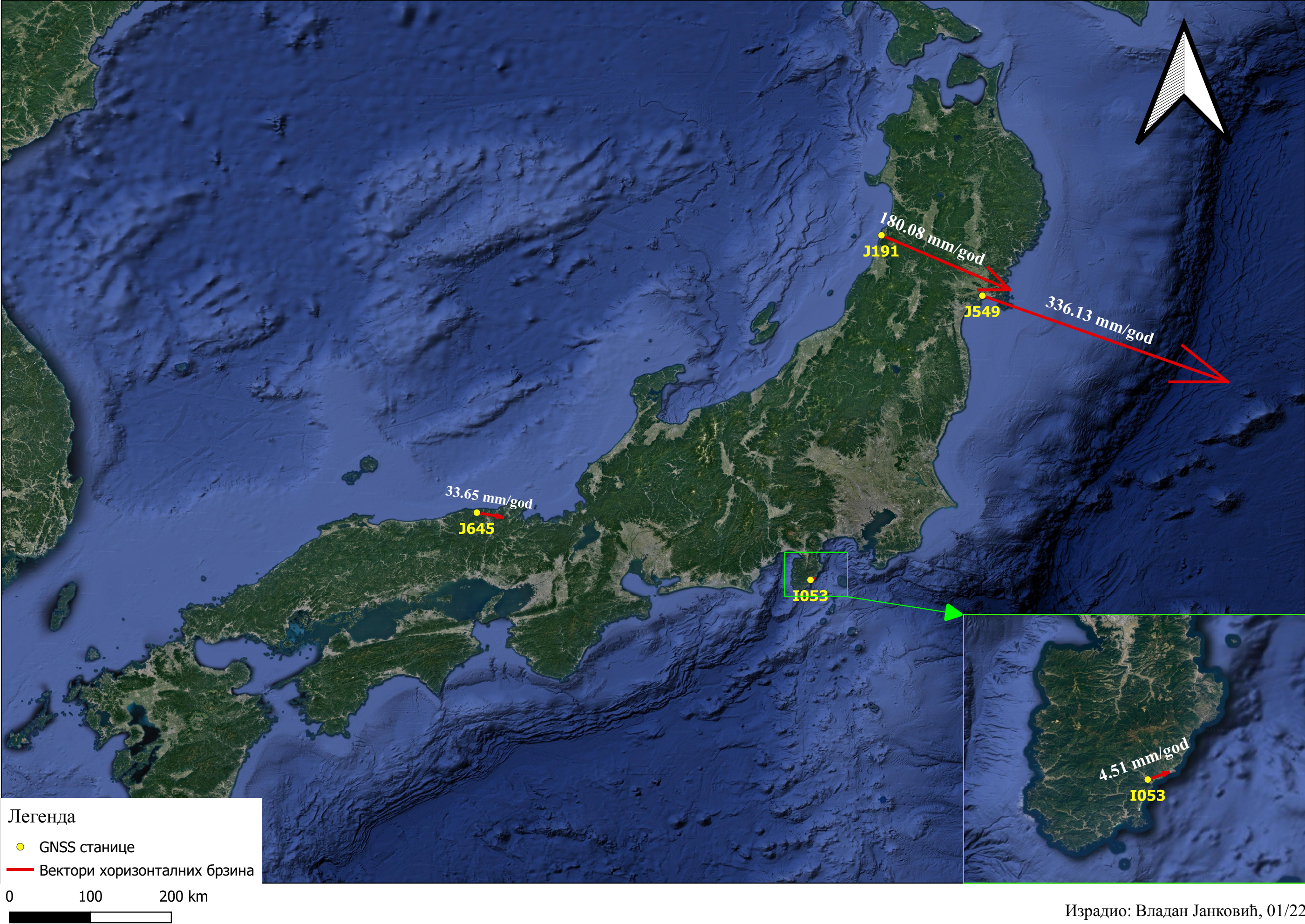
Хистограм резидуала временске серије GNSS станице J645 (N, E, U)



ПРИЛОГ 4

Хоризонталне брзине GNSS станица

ХОРИЗОНТАЛНЕ БРЗИНЕ GNSS СТАНИЦА



ПРИЛОГ 5

Вертикалне брзине GNSS станица

ВЕРТИКАЛНЕ БРЗИНЕ GNSS СТАНИЦА



Легенда

● GNSS станице

0 100 200 km

БИОГРАФИЈА АУТОРА



Владан Јанковић рођен у Бањој Луци 5.8.1999. године. Првих осам разреда основне школе завршио у ОШ "Јован Јовановић Змај" Србац. Са поласком у школу, почео је да тренира фудбал у школи фудбала "Dream team", а послје и за београдски Партизан. Са 13 година одлази у Нови Сад и завршава основно образовање у ОШ "Прва војвођанска бригада". Селидби у Нови Сад претходио је позив ФК "Војводина" да пређе у њихове редове. У Новом Саду остаје три године, гдје поред фудбалских обавеза, успјешно и са одличним просјеком завршава и два разреда у Гимназији "Светозар Марковић". Схватајући да више афинитета има према науци, одлучује да се врати у родни Србац гдје завршава друга два разреда гимназије у ЈУ ЦСШ "Петар Кочић", а фудбалом наставља да се бави рекреативно. Након средње школе уписује Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет у Бањој Луци, смјер геодезија. Звање дипломираног инжењера геодезије стекао је у октобру 2022. године са просјечном оцјеном 9.81. Током основних студија био је стипендиста Фонда „Др Милан Јелић“ и добитник признања за најбољег дипломираног студента СП Геодезија у академској 2021/2022. години. По завршетку основних студија, исте године уписује мастер студије на Архитектонско-грађевинско-геодетском факултету у Бањој Луци. У мају 2023. започиње приправнички стаж у Републичкој управи за геодетске и имовинско-правне послове – Подручна јединица Србац.

УНИВЕРЗИТЕТУ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР/МАГИСТАРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора мастер/магистарског рада

Владан Јанковић

Датум, мјесто и држава рођења аутора

05.08.1999. Бања Лука, Република Српска/Босна и Херцеговина

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања

Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Универзитет у Бањој Луци, 2022. година

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора

07.10.2022.

Наслов завршног/дипломског рада аутора

Анализа тачности и поступак испитивања нивелира према ISO 17123-2

Академско звање коју је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада

Дипломирани инжењер геодезије

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер/магистарског рада

Мастер инжењер геодезије

Назив факултета/Академије на коме је мастер/магистарски рад одбрањен

Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Универзитет у Бањој Луци

Наслов мастер/магистарског рада и датум одбране

Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске серије GNSS координата

Научна област мастер/магистарског рада према CERIF шифрарнику

Научна област: Геодетски референтни системи;

Научно поље: Геодезија;

Класификациона ознака: Р 515.

Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер/магистарског рада

Проф. др Миодраг Регодић – председник;

Доц. др Сања Туцикешић – ментор и члан;

Проф. др Сњежана Максимовић – члан.

У Бањој Луци, дана 20.10.2023.





На основу члана 61. Закона о високом образовању ("Службени гласник Републике Српске", број 67/20) и члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци а на приједлог Вијећа СП Геодезија, Наставно-научно вијеће Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета је на 12. сједници одржаној 07.09.2023. године донијело одлуку број: 14/3.1267/23 од 07.09.2023. године о именовању Комисије за преглед и оцјену завршног рада II циклуса студија, Студијског програма геодезија, кандидата **Владана (Васкрсија) Јанковића**, број индекса **01МГео/2022** под називом:

МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА

Именована је Комисија у сљедећем саставу:

1. Проф. др Миодраг Регодић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Фотограметрија и даљинско истраживање – председник;
2. Доц. др Сања Туцикеша, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: Геодетски премјер – ментор и члан;
3. Проф. др Снежана Максимовић, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, ужа научна област: математичка анализа и примјене, члан.

Комисија је прегледала, анализирао завршни рад и установила да је кандидат **Владан (Васкрсија) Јанковић**, број индекса **01МГео/2022** испунио све формалне услове, и предао текст завршног рада II циклуса у прописаној форми, те Наставно-научном вијећу подноси сљедећи

**ИЗВЈЕШТАЈ
О ПРЕГЛЕДУ И ОЦЕНИ ЗАВРШНОГ РАДА**

I ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

Лични подаци

Име и презиме:	Владан (Васкрсија) Јанковић
Датум рођења:	05.08.1999.
Мјесто рођења:	Бања Лука, РС, БиХ
Адреса становања:	Видовданска 29
Мјесто боравка:	Србац
Број телефона:	066/235-375
E-mail:	vladan.jankovic@student.aggf.unibl.org
Држављанство:	Република Српска/Босна и Херцеговина

Образовање

2018 – 2022. године	Образовна институција: Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Универзитет у Бањој Луци Смјер: Геодезија Звање: Дипломирани инжењер геодезије (240 ЕЦТС)
---------------------	--

Тема завршног рада првог циклуса студија: Анализа тачности и поступак испитивања нивелира према ISO 17123-2, Оцијењен одличном оцјеном: 10.00
Просјечна оцјена током студија: 9.81

2014 – 2018. године **Образовна институција:** ЈУ ЦСШ „Петар Кочић“ Србац – Гимназија
Смјер: Општи
Одличан ученик

2005 – 2014. године **Образовна институција:** Основна школа "Прва војвођанска бригада" Нови Сад
Одличан ученик

Радно искуство

05.2023 – данас **Послодавац:** Републичка управа за геодетске и имовинско-правне послове – Подручна јединица Србац
Позиција на послу: Приправник

Личне вјештине

Матерњи језик: Српски језик
Страни језици: Енглески језик
Њемачки језик
Информатичка писменост: Microsoft Office, AutoCAD, QGIS, Enterprise Architect, FME, Java, Python, MATLAB
Возачка дозвола: Категорија Б

II ПОДАЦИ О ЗАВРШНОМ РАДУ

Кандидат **Владан (Васкрсија) Јанковић**, број индекса **01МГео/2022** определијелио се за истраживачки и стручни рад у области: Геодетски референтни системи (Геодетска геодинамика).

Мастер рад је провјерен путем званичног софтвера за откривање плагијата дана 03.10.2023. године.

Завршни рад носи назив „**МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА**“, и обухвата 109 страница од чега је 70 страница текста са описом теоријског и практичног истраживања, а уз то и 17 страница прилога. Рад садржи и списак коришћене литературе од 48 извора, 38 слика и 6 табела.

Предметни завршни - мастер рад кандидата **Владана (Васкрсија) Јанковића**, је следећег садржаја:

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА
 - 1.1. Предмет и циљ истраживања
 - 1.2. Полазне хипотезе
 - 1.3. Методе истраживања
 - 1.4. Структура рада
2. ГЕОДИНАМИКА
 - 2.1. Тектоника плоча
 - 2.2. Сеизмологија

- 2.2.1. Могућности анализе временских серија GNSS координата за предвиђање сеизмичких активности
- 2.2.2. Упозорење на земљотрес у реалном времену
- 2.3. Геодетске технике мјерења за геодинамичка истраживања
- 2.4. Развој GNSS мрежа за геодинамику
- 3. ГЛОБАЛНИ НАВИГАЦИОНИ САТЕЛИТСКИ СИСТЕМИ
- 3.1. Основни концепт GNSS позиционирања
- 3.2. Типови GNSS позиционирања
- 3.3. Подјела GNSS система
- 3.3.1. Глобални позициони систем GPS
- 3.3.2. Глобални навигациони сателитски систем GLONASS
- 3.3.3. BeiDou
- 3.3.4. Galileo
- 3.4. Примјена GNSS система
- 4. ГЛОБАЛНИ ПОЗИЦИОНИ СИСТЕМ
- 4.1. Архитектура система
- 4.2. Структура GPS сигнала
- 4.3. Извори грешака приликом мјерења
- 4.3.1. Грешке сателитског поријекла
- 4.3.2. Грешке услед простирања сигнала кроз атмосферу
- 4.3.3. Грешке пријемника и антене
- 4.4. Математички модел GPS мјерења
- 4.4.1. Функционални модел GPS мјерења
- 4.4.2. Стохастички модел GPS мјерења
- 5. ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ
- 5.1. Дефиниција и подјела временских серија
- 5.2. Математички модел временске серије GNSS координата
- 5.3. Анализа временских серија
- 6. КАЛМАНОВ ФИЛТЕР
- 6.1. Уопштено о Калмановом филтеру
- 6.2. Нелинеарни Калманов филтер
- 6.3. Примјена
- 7. МОДЕЛОВАЊЕ ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА GNSS КООРДИНАТА
- 7.1. Подручје истраживања
- 7.2. Приступ подацима
- 7.3. Примјена SARI софтвера за анализу временских серија
- 7.4. Анализа добијених резултата
- 8. ЗАКЉУЧАК

Мастер рад се састоји од осам поглавља, гдје прво поглавље представља увод у сам рад. У њему је укратко описана теорија тектонских плоча, а поред тога и геодетске технике мјерења које се примјењују у геодинамичким истраживањима.

Према теорији тектонских плоча, литосфера је подијељена на веће или мање дијелове који се крећу различитим брзинама, због чега долази до интеракције на њиховим границама. Границе литосферних плоча могу бити конвергентне, дивергентне и трансформне, а посљедица њихове интеркације у граничним зонама су сеизмичке и вулканске активности. Друго поглавље посвећено је геодинамици, у коме је детаљније описана теорија тектонских плоча, као и технике геодетских мјерења за потребе геодинамичких истраживања.

Развој глобалних навигационих сателитских система омогућио је праћење помјерања литосферних плоча. У складу са тим, процјеном координата и њихових промјена током времена изводе се брзине великог броја станица широм Земље, на основу којих се моделују покрети литосферних плоча. У трећем поглављу приказани су основи концепти GNSS позиционирања, као и заједничке карактеристике GNSS система, док четврто поглавље обрађује GPS систем.

Мастер рад је посвећен моделовању тектонских помјерања на основу временских серија GNSS координата које су анализирани примјеном Калман филтера. У петом поглављу су дефинисане временске серије, као и основне методе анализе временских серија, при чему се Калман филтер детаљније описује у шестом поглављу.

Подручје истраживања обухвата територију Јапана коју карактерише изражена сеизмичка активност. На овом простору долази до сучељавања Пацифичке, Филипинске, Сјеверноамеричке и Евроазијске плоче, гдје је субдукција Пацифичке и Сјеверноамеричке плоче резултирала разорним земљотресом Тохоку 2011. године. Седмо поглавље презентује практични дио рада, гдје је детаљније описано подручје истраживања. Поред тога, приказани су расположиви подаци Геодетске лабораторије Неваде, као и основне функционалности програма SARI. Након обраде временских серија, извршена је анализа остварених резултата.

Осмо поглавље садржи изведене закључке на основу анализираних досадашњих истраживања везаних за примјену GNSS алата у геодинамичким истраживањима и на основу остварених резултата у експерименталном дијелу мастер рада.

ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Тектоника плоча и геодинамичка активност на Земљи данас су један од најзначајнијих научних изазова, у којем примјена GNSS система има значају улогу. Преко глобалних, континенталних и регионалних мјерења долази се до детаљнијег увида у узроке помјерања Земљине коре.

Велики значај за геодинамичка истраживања имају временске серије GNSS координата, посебно континуирана GNSS мјерења. Временске серије GNSS координата се примјењују за различита геодинамичка истраживања као што су: проучавање кретања тектонских плоча, деформација Земљине коре које настају као посљедица земљотреса, вулкана и других геофизичких појава.

Предмет овог мастер рада представља анализа временских серија GNSS координата континуираних мјерења примјеном Калмановог филтера и моделовање површинских деформација, односно кретања литосферних плоча примјеном алата отвореног кода.

Временске серије GNSS координата континуираних мјерења су преузете са сљедећих GNSS станица које се налазе на јапанском острву Хоншу:

1. J549 — налази се у префектури Miyagi у близини града Higashimatsushima,
2. J191 — налази се у префектури Akita у близини града Nikaho,
3. I053 — налази се у префектури Shizuoka у близини града Kawazu,
4. J645 — налази се у префектури Hyogo у близини града Kami.

ХИПОТЕЗЕ СА ОБРАЗЛОЖЕЊЕМ

У оквиру мастер рада дефинисане су следеће полазне хипотезе:

Општа хипотеза:

На основу анализе отворених података временских серија GNSS координата примјеном Калмановог филтера могу се моделовати тектонска помјерања на подручју Јапана.

Алтернативна хипотеза:

Примјеном Калмановог филтера на анализиране отворене податке временских серија GNSS координата, може се донијети закључак да постоји веза између тектонских помјерања на подручју Јапана и земљотреса, што указује на могућност кориштења овакве методологије у предвиђању земљотреса.

Да би се извршило моделовање тектонских помјерања неопходно је обавити анализу временских серија са циљем добијања брзина GNSS станица. Један од најчешћих природних узрока земљотреса је управо интеракција тектонских плоча на њиховим границама. Поред све масовнијих истраживања сеизмичких активности сам процес и узрок настанка земљотреса још увијек није довољно схваћен. Велику улогу у данашњим истраживањима имају континуирана GNSS мјерења и временске серије GNSS координата. За адекватну анализу и интерпретацију временских серија GNSS координата кориштен је програм отвореног кода SARI.

ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

На основу полазног проблема и предмета истраживања постављени су основни циљеви истраживања:

- Анализа досадашњих истраживања везаних за примјену GNSS алата у геодинамичким истраживањима.
- На основу доступних података и алата потребно је извршити процјену тектонских помјерања подручја истраживања и успоставити однос између површинских деформација и тектонских активности.

Кончан циљ спроведеног истраживања је да се на основу доступних података и алата изврши процјена тектонских помјерања на посматраном подручју и успостави однос између тектонских активности и земљотреса.

МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Планирано истраживање за потребе израде мастер рада извршено је комбинацијом различитих научних метода у циљу евалуације постављених хипотеза. С тим у вези извршена је анализа научне и стручне литературе која се односи на временске серије GNSS координата, као и литература за употребу софтвера SARI.

Током спроведеног истраживања најрелевантније су следеће научне методе:

- Аналитичка метода, којом је тема рада рашчлањена на мање цјелине ради једноставнијег истраживања и дефинисања неопходних поглавља у раду;
- Синтетичка метода, којом се након изведених појединачних закључака, они обликују у једну цјелину;
- Индуктивна метода, којом се полазећи од појединачних премиса долази до општих закључака;
- Дедуктивна метода, којом се полазећи од општих знања долази до посебних и појединачних закључака;
- Метода генерализација, којом се врши уопштавање од посебног појма до уопштенијег;
- Дескриптивна метода, која се користи за описивање различитих чињеница, процеса и појава у природи;
- Компаративна метода је концепт упоређивања између двије појаве или процеса;

- Метода моделовања, којом се генерише знаковни систем помоћу којег се може замијенити предмет који се истражује.

IV ЗАКЉУЧАК

Комисија закључује да је завршни рад урађен у складу са Правилником о завршним радовима студената на II циклусу студија Архитектонско-грађевинског факултета Универзитета у Бањој Луци и да представља вриједан допринос науци и струци у оквиру научног поља Геодезија, те наглашава кључне квалитете рада:

У раду је потврђена могућност примјене Калман филтер приликом анализе временских серија GNSS координата са циљем добијања брзина GNSS станица. На основу брзина станица извршено је моделовање тектонских помјерања на подручју истраживања. Анализом процјењених брзина закључено је да хоризонтална и вертикална кретања острва Хоншу нису хомогена, што проистиче из чињенице да се посматране станице налазе на различитим тектонским плочама. Добијена вертикална помјерања су сагласна са уоченом субдукцијом Пацифичке плоче под копнени дио Јапана, што је 2011. године довело до разорног земљотреса Тохоку. На основу изведеног модела тектонских помјерања на подручју Јапана потврђена је општа хипотеза мастер рада.

Већина земљотреса настаје као посљедица тектонске активности која је веома изражена на овом простору. Посматрањем анализираних временских серија лако се уочавају офсети који су проузроковани између осталог и земљотресима. На основу наведеног, закључује се да земљотреси остављају свакако запажен траг у временским серијама координата добијених GNSS технологијом. Анализом офсета могу се извући значајни подаци о сложености земљотреса као и о постсеизмичким деформацијама. Посматрањем офсета у временским серијама, закључено је да је њихов интензитет сразмјеран растојању GNSS станице од епицентра земљотреса.

V ПРИЈЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Комисија предлаже Наставно-научном вијећу да одобри одбрану завршног (мастер) рада кандидата **Владана (Васкрсија) Јанковића**, број индекса **01МГео/2022** под називом: **„МОДЕЛОВАЊЕ ТЕКТОНСКИХ ПОМЈЕРАЊА ПРИМЈЕНОМ КАЛМАН ФИЛТЕРА НА ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ GNSS КООРДИНАТА“**.

У Бањој Луци, 06.10.2023. године

Потпис чланова Комисије



Проф. др Миодраг Петровић, предсједник



Доц. др Сања Туциковић, ментор и члан



Проф. др Сњежана Максимовић, члан

Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

**Изјављујем да је
мастер/магистарски рад**

Наслов рада: Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске серије GNSS координата

Наслов рада на енглеском језику: Modeling of tectonic movements using Kalman filter to time series of GNSS coordinates

- ☐ резултат сопственог истраживачког рада,
- ☐ да мастер/магистарски рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- ☐ да су резултати коректно наведени и
- ☐ да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци 20.10.2023.

Потпис кандидата

Владан Јанковић

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује АГГФ факултет/ Академија умјетности Универзитета у Бањој Луци да мастер/магистарски рад учини јавно доступним

Овлашћујем АГГФ факултет/ Академију умјетности Универзитета у Бањој Луци да мој мастер/магистарски рад, под насловом

Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске серије GNSS координата

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер/магистарски рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер/магистарски рад, похрањен у д и г и т а л н и р е п о з и т о р и ј у м Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
- ☒ 2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Бањој Луци 20.10.2023.

Потпис кандидата

Благан Јанковић

Изјава 3

**Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
мастер/магистарског рада**

Име и презиме аутора: Владан Јанковић

Наслов рада: Моделовање тектонских помјерања примјеном Калман филтера на временске
серије GNSS координата

Ментор: Доц. др Сања Туцикешаћ, дипл. инж. геод.

Изјављујем да је штампана верзија мог мастер/магистарског рада идентична електронској
верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци 20.10.2023.

Потпис кандидата

Владан Јанковић