

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Bilban, G., 2014. Analiza kakovosti določitve položaja v omrežjih postaj GNSS. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Stopar, B.): 215 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Bilban, G., 2014. Analiza kakovosti določitve položaja v omrežjih postaj GNSS. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Stopar, B.): 215 pp.

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

Jamova 2, p.p. 3422  
1115 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI  
ŠTUDIJSKI GEODEZIJE**

Kandidat:

**GREGOR BILBAN, univ. dipl. inž. el.**

**ANALIZA KAKOVOSTI DOLOČITVE  
POLOŽAJA V OMREŽJIH POSTAJ GNSS**

**Magistrsko delo štev.: 52/GE**

**QUALITY ANALYSIS OF THE POSITION  
DETERMINATION IN GNSS NETWORKS**

**Master of Science Thesis No.: 52/GE**

**Mentor:**  
prof. dr. Bojan Stopar

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Člani komisije:**  
doc. dr. Miran Kuhar  
doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren  
izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič

Ljubljana, 20. januar 2014



## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**



## **IZJAVE**

Podpisani Gregor Bilban izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Analiza kakovosti določitve položaja v omrežjih postaj GNSS«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 31.10.2013

Gregor Bilban

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 528.2:528.5(043)  
**Avtor:** Gregor Bilban, univ. dipl. inž. el.  
**Mentor:** prof. dr. Bojan Stopar  
**Naslov:** Analiza kakovosti določitve položaja v omrežjih postaj GNSS  
**Tip dokumenta:** magistrsko delo  
**Obseg in oprema:** 215 str., 46 pregl., 117 sl.  
**Ključne besede:** GNSS, vplivi na opazovanja, referenčna postaja, omrežje postaj, MAC, VRS, i-MAX, FKP, RTCM 3.1

### **Izvleček**

Danes je za določitev položaja s satelitskimi navigacijskimi sistemi najbolj razširjena relativna metoda izmere RTK-GNSS, pri kateri se izkorišča dejstvo, da so vplivi na opazovanja prostorsko in časovno korelirani. Problem uporabe enega referenčnega sprejemnika izvira iz vplivov na opazovanja GNSS, ki so odvisna od oddaljenosti med obema sprejemnikoma in se v postopkih tvorjenja faznih razlik ne izničijo v celoti. Te vplive je mogoče zanesljivo modelirati s pomočjo opazovanj množice referenčnih sprejemnikov, ki obkrožajo premični sprejemnik. Omrežje GNSS običajno sestavlja vsaj 5 referenčnih postaj, ki so povezane z osrednjim računalnikom, kjer se s skupno obdelavo vseh opazovanj določijo prostorsko odvisni vplivi na opazovanja v celotnem omrežju. V magistrskem delu so predstavljeni različni mrežni koncepti s poudarkom na konceptu Master-Auxiliary predvsem s stališča določitve in razpošiljanja popravkov RTK.

V sklopu magistrskega dela je bilo vzpostavljeno lastno omrežje GNSS, ki je bilo v največji možni meri podobno državnemu omrežju SIGNAL. Analizirane so bile zmogljivosti obeh omrežij s stališča kakovosti določitve položaja ob uporabi različnih mrežnih konceptov ter različnih proizvodov RTK v odvisnosti od oddaljenosti od najbližje referenčne postaje ter vpliv dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja. Preverila se je pravilnost vsebine sporočil RTCM, ki sta jih omrežji posredovali premičnim sprejemnikom, ter ocenila potrebna pasovna širina za pošiljanje popravkov RTK. V ta namen so bile izbrane štiri testne točke, na katerih so bila opravljena 24-urna opazovanja s štirimi sprejemniki GNSS. Na podlagi preučitve prednosti in slabosti različnih mrežnih konceptov ter analize terenskih meritev so bila podana priporočila upravljavcem in uporabnikom omrežij GNSS.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 528.2:528.5(043)  
**Author:** Gregor Bilban, B.Sc.  
**Supervisor:** prof. Bojan Stopar, Ph.D.  
**Title:** Quality Analysis of the Position Determination in GNSS Networks  
**Document type:** M.Sc. Thesis  
**Scope and tools:** 215 p., 46 tab., 117 fig.  
**Keywords:** GNSS, error sources, reference station, GNSS network, MAC, VRS, i-MAX, FKP, RTCM 3.1

### **Abstract**

RTK is most widely used method of surveying with GNSS today. Conventional RTK positioning system typically comprises of a single reference station and a rover. The later combines observations from both stations and provides a baseline estimate. The accuracy of such approach is limited by the spatial decorrelation of error sources mainly induced by the atmosphere and ephemerides. With the increasing distance between reference station and rover it is no more possible to eliminate errors using traditional double-differencing. However, they can be successfully modeled using a group of reference stations. GNSS network consist of reference stations that are connected to a central processing facility. Observations of all reference stations are processed together in order to determine distant dependent errors across the network. In the master's thesis different network approaches were studied with the main focus on determination and dissemination of RTK corrections following Master-Auxiliary concept.

As part of the thesis own GNSS network was established that resembled Slovenian national network SIGNAL in the biggest extent possible. Several 24-hour measurements with 4 identical GNSS receivers were performed to evaluate rover performances in each network based on different network approaches and different RTK products. Testing points were carefully selected inside the network in order to study the quality of the position determination at different distances to the closest reference station and the influence of measurement interval on the position quality. The correctness of RTCM messages and the required bandwidth were also evaluated. Based on the investigated benefits and drawbacks of respective network approaches and the analysis of field measurements recommendations to both rover users and network operators were suggested.

## ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri ustvarjanju magistrskega dela se zahvaljujem:

- g. Andreju Bilbanu iz podjetja Geoservis, d.o.o. za izposajo merske opreme, računalniške in komunikacijske infrastrukture ter za logistično in finančno podporo,
- g. Seppu Englbergerju in g. Markusu Ziyeisu iz Leice Geosystems GmbH, Nemčija za izposajo merske opreme,
- g. Franku Pacheju iz Leice Geosystems AG, Švica za izposajo programske opreme za realizacijo omrežja,
- g. Nicolasu DeMoegenu, g. Markusu Rolandu, g. Ulfu Glueckertu in g. Ivanu Planovskymu iz Leice Geosystems AG, Švica za pogovore, ideje in nasvete,
- Geodetski upravi R Slovenije za dostop do podatkov omrežja SIGNAL,
- ga. Katji Bajec iz Geodetskega inštituta Slovenije za tehnično podporo pri dostopu do podatkov omrežja SIGNAL,
- g. Helmutu Titzu iz Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Avstrija za dostop do podatkov omrežja APOS,
- g. Marijanu Marjanoviću iz Državne geodetske uprave R Hrvatske za dostop do podatkov omrežja CROPOS,
- g. Tamásu Horváthu iz Földmérési és Távérzékelési Intézet, Madžarska za dostop do podatkov omrežja GNSSNet.hu,
- g. Germanu Vitaliju iz podjetja AZ Net, d.o.o. za izposajo strežnika,
- Telekomu Slovenije za izposajo kartic SIM,
- ga. Desanki Ramšak in g. Bojanu Mraku za izposajo kartic SIM.

Posebej se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bojanu Stoparju za strokovne pogovore in spodbude vsa leta mojega študija geodezije.

Ne nazadnje pa se zahvaljujem tudi družini in staršem za podporo in spodbudo. Hvala, ker ste zdržali z mano.

## KAZALO VSEBINE

Stran za popravke	I
Izjave II	
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
Kazalo vsebine	VI
Kazalo preglednic	IX
Kazalo slik	XI
List of tables	XVI
List of figures	XVIII
Kratice	XXIII
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Opis problema in izhodišča	1
1.2 Cilji in metode dela	2
1.3 Struktura magistrskega dela	3
<b>2 PREGLED PODROČJA</b>	<b>5</b>
2.1 Na kratko o GNSS	5
2.1.1 Osnovna zamisel	5
2.1.2 Razdalja od satelita	7
2.1.3 Določitev absolutnega položaja iz opazovanj kode	8
2.1.4 Fazne razlike in kombinacije opazovanj	11
2.1.5 Referenčni satelit in referenčni sprejemnik	15
2.1.6 Relativna določitev položaja iz opazovanj faze	16
2.1.7 Metoda LAMBDA	17
2.1.8 Kalmanov filter	20
2.1.9 Metode izmere GNSS	20
2.1.10 Koordinatni sistemi in koordinatni sestavi	22
2.1.11 Z GNSS povezani koordinatni sistemi in koordinatni sestavi	23
2.1.12 Prenos podatkov GNSS v realnem času	25
2.1.13 RTCM 3.x	26
2.2 Vplivi na opazovanja GNSS	30
2.2.1 Tirnica satelita	33
2.2.2 Pogrešek satelitove ure	34
2.2.3 Zakasnitev zaradi elektronskih sestavov satelita	34
2.2.4 Relativistični učinek	34
2.2.5 Vpliv medsebojnega vrtenja anten satelita in sprejemnika	34
2.2.6 Vpliv spreminjanja faznega centra satelitove antene	35
2.2.7 Pogrešek sprejemnikove ure	36
2.2.8 Vpliv večpotja	36
2.2.9 Vpliv spreminjanja faznega centra sprejemnikove antene	37
2.2.10 Zakasnitve zaradi elektronskih sestavov sprejemnika	38
2.2.11 Vpliv atmosfere	40

2.3 Omrežja GNSS	43
2.3.1 Od referenčne postaje do omrežja	43
2.3.2 Koncepti omrežij GNSS	45
2.3.3 Koncept Master-Auxiliary	49
2.3.4 Delovanje omrežja po konceptu Master-Auxiliary	55
2.3.5 Popravki MAC na premičnem sprejemniku	57
2.3.6 Primerjava konceptov	59
<b>3 METODE</b>	<b>69</b>
3.1 Uvod	69
3.2 Podatki referenčnih postaj omrežja	69
3.3 Oprema za izvedbo terenskih meritev	71
3.3.1 Uporabljena merska oprema	71
3.3.2 Tehnični podatki o merski opremi	73
3.3.3 Nastavitve sprejemnikov GNSS	77
3.4 Računalniška oprema	78
3.4.1 Infrastruktura IKT	78
3.4.2 Programska oprema za upravljanje omrežji GNSS	78
3.4.3 Sistemska arhitektura in delovanje programa Leica GNSS Spider	81
3.5 Testne točke za izvedbo meritev	95
3.5.1 Izbira lokacij testnih točk	95
3.5.2 Ugotavljanje primernosti lokacij	98
3.5.3 Določitev koordinat testnih točk	105
3.5.4 Izbira in določitev koordinat testne točke Arnače	109
3.6 Ekonomski vidiki opravljenih terenskih meritev	113
<b>4 RAZISKAVA</b>	<b>117</b>
4.1 Namen praktičnega dela	117
4.2 Priprava merske opreme	117
4.3 Izbira testov	118
4.4 Merila za ocenjevanje kakovosti meritev	120
4.5 Vzpostavitev lastnega omrežja referenčnih postaj GNSS	120
4.5.1 Podatki o referenčnih postajah GNSS	121
4.5.2 Upravljanje z antenami GNSS	123
4.5.3 Upravljanje z antenami GNSS na premičnem sprejemniku	126
4.5.4 Nastavitve lastnega omrežja GNSS	127
4.6 Priprava podatkov za analizo	131
4.7 Rezultati meritev	132
4.7.1 Proizvodi RTK omrežja SIGNAL	132
4.7.2 Mrežni proizvodi RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja	143
4.7.3 Proizvodi RTK lastnega omrežja	152
4.7.4 Pasovna širina, potrebna za prenos referenčnih podatkov	155
4.7.5 Vsebina sporočil RTK	156
4.7.6 Vpliv dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja	159
<b>5 ANALIZA</b>	<b>165</b>
5.1.1 Primerjava proizvodov RTK omrežja SIGNAL	165

5.1.2 Primerjava mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja	170
5.1.3 Primerjava proizvodov lastnega omrežja	174
5.1.4 Primerjava vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja	177
5.1.5 Prednosti uporabe satelitov GLONASS	177
5.1.6 Analiza grobo pogrešenih meritev	183
5.1.7 Oblikovanje celice	190
5.1.8 Kakovost danih koordinat referenčnih postaj	196
5.1.9 Analiza potrebne pasovne širine za prenos popravkov RTK	197
<b>6 ZAKLJUČEK</b>	<b>201</b>
6.1 Začetni napor	201
6.2 Ugotovitve in predlogi za uporabnike omrežij GNSS	201
6.3 Ugotovitve in predlogi za upravljavce omrežij GNSS	204
6.4 Predlogi in možnosti za nadaljnje raziskave	207
<b>7 VIRI</b>	<b>209</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Struktura sporočila RTCM 3.x (RTCM 10403.1:2009).	27
Preglednica 2: Prve štiri skupine sporočil RTCM 3.	28
Preglednica 3: Druge skupine sporočil RTCM 3.	29
Preglednica 4: Lastnosti glavnih vplivov na opazovanja GNSS.	32
Preglednica 5: Ovrednotenje štirih različnih mrežnih konceptov (Leica Geosystems, 2008b).	48
Preglednica 6: Povprečne teoretične pasovne širine za tri mrežne koncepte. Povzeto po (Janssen, 2009).	67
Preglednica 7: Povprečne pasovne širine za tri mrežne koncepte izmerjene v omrežju CORSnet-NSW. Povzeto po (Janssen, 2009).	67
Preglednica 8: Podatki o uporabljeni merski opremi na referenčnih postajah.	71
Preglednica 9: Uporabljena merska oprema za izvedbo terenskih meritev.	72
Preglednica 10: Analiza sledenja signalov na točki Šentjakob.	100
Preglednica 11: Analiza sledenja signalov na točki Šentvid.	102
Preglednica 12: Analiza sledenja signalov na točki Brdo.	103
Preglednica 13: Koordinate in ocena natančnosti točke Šentjakob ter odstopanja baznih vektorjev.	107
Preglednica 14: Koordinate in ocena natančnosti točke Šentvid ter odstopanja baznih vektorjev.	107
Preglednica 15: Koordinate in ocena natančnosti točke Brdo ter odstopanja baznih vektorjev.	108
Preglednica 16: Analiza sledenja signalov na točki Arnače.	110
Preglednica 17: Koordinate in ocena natančnosti točke Arnače ter odstopanja baznih vektorjev.	112
Preglednica 18: Ocena vrednosti opreme in komunikacije za izvedbo terenskih meritev.	113
Preglednica 19: Ocena števila opravljenih kilometrov.	115
Preglednica 20: Parametri za dostop do tokov podatkov referenčnih postaj.	122
Preglednica 21: Potrebne nastavitve anten na premičnem sprejemniku GNSS glede na nastavitve upravljanja z antenami v osrednji programski opremi za upravljanje z omrežjem.	127
Preglednica 22: Proizvodi RTK lastnega omrežja GNSS.	130
Preglednica 23: Povprečne količine sprejetih in poslanih podatkov RTK ter ocena pasovne širine.	156
Preglednica 24: Podatki o referenčni postaji, kot jih je iz sporočil RTCM dekodiral premični sprejemnik.	157
Preglednica 25: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	168
Preglednica 26: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	168
Preglednica 27: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	169
Preglednica 28: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	172



Preglednica 29: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	172
Preglednica 30: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	173
Preglednica 31: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	175
Preglednica 32: Največje odstopanje od pravega položaja v vseh testih in pri vseh oddaljenostih od najbližje referenčne postaje.	183
Preglednica 33: Število grobo pogrešenih meritev glede na uporabljen proizvod RTK.	183
Preglednica 34: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: MAC TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 15 km«.	184
Preglednica 35: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: SG GG TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	185
Preglednica 36: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: SG TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	185
Preglednica 37: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: MAC TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	186
Preglednica 38: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: VRS TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	186
Preglednica 39: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: NEAREST LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	188
Preglednica 40: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: i-MAX LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	188
Preglednica 41: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: ViRS LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.	188
Preglednica 42: Oblika celice in vključene referenčne postaje v primeru omrežja SIGNAL pri različnih oddaljenostih od najbližje referenčne postaje.	190
Preglednica 43: Oblika celice in vključene referenčne postaje v primeru lastnega omrežja pri oddaljenosti 15 km od najbližje referenčne postaje.	192
Preglednica 44: Koordinate testne točke Arnače, določene z različnih referenčnih postaj omrežja SIGNAL.	196
Preglednica 45: Rezultati meritev na testni točki Arnače za primer: čas trajanja meritve 10 s, koordinate točke določene z referenčnih postaj GSR1, Trebnje in Slovenj Gradec.	197
Preglednica 46: Rezultati meritev na testni točki Arnače za primer: čas trajanja meritve 10 s, koordinate točke določene z referenčne postaje Celje.	197

## KAZALO SLIK

Slika 1: Satelit GPS IIF-3, nameščen v prostoru za tovor na vrhu nosilne rakete Delta IV (Blau, 2012).	5
Slika 2: Spektralna gostota moči signala GPS. Na levi skali so prikazane moči, ki jih zazna antena na Zemlji v dBW (decibeli glede na 1 W moči oddajnika), na desni pa razmerje moči glede na nivo termičnega šuma.	7
Slika 3: Struktura navigacijskega sporočila GPS.	8
Slika 4: Sprejemnik GNSS meri fazno razliko med sprejetim in lokalno ustvarjenim nosilnim signalom le znotraj ene valovne dolžine.	12
Slika 5: Dvojne fazne razlike se določi kot razliko opazovanj faze med dvema sprejemnikoma in dvema satelitoma.	13
Slika 6: Postopek reševanja problema po metodi najmanjših kvadratov v primeru, da so nekatere neznanke cela števila.	19
Slika 7: Različne metode izmere GNSS.	21
Slika 8: Koordinatni referenčni sistem je koordinatni sistem, ki je preko geodetskega datuma povezan s telesom Zemlje (Mozetič, 2006).	23
Slika 9: Vplivi na opazovanja GNSS.	32
Slika 10: Pri krožno polariziranem elektromagnetnem valovanju valovni vektor opisuje vijačnico (Wikipedia skupnost).	35
Slika 11: Sodobna antena GNSS za referenčne postaje Leica AR20. S 3D dušilnimi obroči (a) in ploskovnim antenskim elementom s priključitvijo na 4 točkah (b) zagotavlja najboljšo krožno polarizacijo na vsem frekvenčnem pasu GNSS, stabilnost faznega centra in izjemno odpornost na večpotje (Walford, 2012).	37
Slika 12: Razširjanje nosilnega in moduliranega valovanja. Točka na ovojnici potuje s skupinsko hitrostjo $c_g$ , nosilni signal pa s hitrostjo razširjanja faze $c_\varphi$ . Produkt koeficienta refrakcije in hitrosti razširjanja je enak hitrosti svetlobe $c_g \cdot n_g = c_\varphi \cdot n_\varphi = c$ .	42
Slika 13: Izmera RTK-GNSS z eno referenčno postajo (a) ter mrežna izmera NRTK-GNSS (b).	43
Slika 14: Koncept modeliranja vplivov na opazovanja v omrežju referenčnih postaj GNSS.	44
Slika 15: Shematska ponazoritev lastnosti posameznih konceptov in strategij pri določitvi položaja v omrežju GNSS: individualizirana mrežna rešitev (a), rešitev z najbližje referenčne postaje (b) in združena mrežna rešitev (c).	47
Slika 16: Grafični prikaz predstavitve popravkov psevdo-razdalj v primeru rešitve z eno referenčno postajo ter mrežnimi koncepti FKP, VRS in MAC. Povzeto in prirejeno po (Wübbena, 2008).	49
Slika 17: V primeru omrežja po konceptu MAC sprejema premični sprejemnik opazovanja vseh postaj v celici.	50
Slika 18: Grafičen prikaz fazne nedoločenosti referenčnih postaj (zgoraj) in skupnega nivoja fazne nedoločenosti v omrežju GNSS (spodaj). Povzeto po (Euler in sod., 2002).	53
Slika 19: Izbira ene referenčne postaje in enega referenčnega satelita, za katera se določijo vse fazne nedoločenosti, predstavlja osnovo za zmanjšanje števila neznank v modelu z nediferenciranimi opazovanji.	56

Slika 20: Shematski prikaz korakov v omrežju GNSS: od zajema podatkov referenčnih postaj do določitve položaja z uporabo vseh podatkov omrežja – mrežne rešitve. Stopnja obdelave opazovanj v centru omrežja predstavlja ločnico med posameznimi mrežnimi koncepti (Wanninger, 2008).	57
Slika 21: Mrežni popravki so po konceptu FKP predstavljeni s koeficienti prostorskih ploskev.	61
Slika 22: Razmerja med različnimi mrežnimi koncepti.	66
Slika 23: Na strehi poslovne stavbe na Litijski cesti 45 v Ljubljani sta nameščeni anteni stalno delujočih referenčnih postaj GSR1(levo) in zasebne referenčne postaje podjetja Geoservis, d.o.o. (desno).	69
Slika 24: Razporeditev referenčnih postaj GNSS slovenskega omrežja SIGNAL in partnerskih referenčnih postaj, ki so vključene v omrežje.	70
Slika 25: Merska oprema med izvajanjem meritev. Na sredini je viden antenski delilnik.	72
Slika 26: Sprejemnik GNSS Leica Viva GS10 – sprednja stran (levo) in spodnja stran (desno) z vsemi priključki, statusnimi LED in ležišči za baterije.	73
Slika 27: Terenska kontrolerja Leica Viva CS10 (levo) in CS15 (desno).	75
Slika 28: Antena GNSS Leica AS10.	76
Slika 29: Zaslonske slike terenskega kontrolerja s prikazom komunikacijskih nastavitev in nastavitev RTK.	77
Slika 30: Umestitev podatkovnega centra lastnega omrežja GNSS v okolje Geoservis.	78
Slika 31: Zaslonska slika Leica GNSS Spider Network Serverja.	79
Slika 32: Razmerja med omrežjem, grozdom in celico omrežja referenčnih postaj GNSS.	80
Slika 33: Zasnova podatkovnega centra omrežja GNSS s stališča računalniške varnosti. Prirejeno po (Leica Geosystems, 2011).	81
Slika 34: Prikaz stanja podatkovnih tokov iz posameznih referenčnih postaj.	83
Slika 35: Grafični prikaz omrežja, aktivnosti posameznih referenčnih postaj, ustvarjenih celic ter vzpostavljenih realno-časovnih povezav omogoča upravljavcu celovit pregled nad delovanjem omrežja.	84
Slika 36: Delovanja procesnega jedra SpiderNET prikazuje seznam, kjer so z barvnimi stolpci prikazana stanja posameznih satelitov.	85
Slika 37: Izbira celice ter glavne postaje se v osrednji programski opremi omrežja GNSS ves čas preverja in prilagaja položaju premičnega sprejemnika in razmeram v omrežju.	87
Slika 38: Celovit prikaz uporabnikov storitev RTK, ki so trenutno povezani v omrežje GNSS.	89
Slika 39: Administratorski portal Spider Business Center za upravljanje z uporabniki, proizvodi in storitvami.	90
Slika 40: Podatkovne povezave med posameznimi deli sistema Leica GNSS Spider. Povzeto in prirejeno po (Leica Geosystems, 2011).	91
Slika 41: Spletni portal Leica SpiderWeb je orodje za predstavitev omrežja GNSS na internetu.	92
Slika 42: Leica SpiderQC je lahko integriran v spletni portal SpiderWeb, kjer uporabnikom posreduje informacije o zmogljivosti omrežja.	93
Slika 43: Izpisi in grafični prikazi, ki jih samodejno pripravlja Leica SpiderQC, omogočajo nadzor nad kakovostjo delovanja referenčnih postaj in omrežij.	94
Slika 44: Položaji testnih točk z označenimi najbližjimi referenčnimi postajami.	96
Slika 45: Karta s prikazom razdalj med najbližjimi referenčnimi postajami.	97
Slika 46: Stabilizacija in mikrolokacija točke Šentjakob.	97
Slika 47: Stabilizacija in mikrolokacija točke Šentvid.	98

Slika 48: Stabilizacija in mikrolokacija točke Brdo.	98
Slika 49: Višinski koti horizonta na točki Šentjakob (desno z vplivom daljnovoda v bližini). Rdeča črta predstavlja 15° višinski kot.	99
Slika 50: Višinski koti horizonta na točki Šentvid	99
Slika 51: Višinski koti horizonta na točki Brdo.	100
Slika 52: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Šentjakob.	101
Slika 53: Razpoložljivost signalov GNSS na točki Šentjakob.	101
Slika 54: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Šentvid.	103
Slika 55: Razpoložljivost signalov GNSS na točki Šentvid.	103
Slika 56: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Brdo.	104
Slika 57: Razpoložljivost signalov na točki Brdo.	105
Slika 58: Naknadna obdelava opazovanj GNSS in določitev koordinat testnih točk je bila opravljena s programskim paketom Leica Geo Office.	106
Slika 59: Prikaz izračunanih baznih vektorjev za testno točko Brdo.	106
Slika 60: Položaj testne točke Arnače.	109
Slika 61: Merska oprema med izvedbo meritev na testni točki Arnače.	110
Slika 62: Razpoložljivost satelitov na točki Arnače.	111
Slika 63: Razpoložljivost signalov na točki Arnače.	112
Slika 64: Avtor naloge med izvedbo terenskih meritev na testni točki Šentjakob.	117
Slika 65: Lastno omrežje GNSS realizirano s programom Leica GNSS Spider.	121
Slika 66: Nastavitev parametrov za shranjevanje datotečnih proizvodov Rinex v programu GNSS Spider.	123
Slika 67: Antena Leica AR25 Rev.4 z antenskim elementom Dorne-Margolin in 3D dušilnimi obročji.	124
Slika 68: Premični sprejemnik lahko podatke o referenčni anteni in sprejemniku razbere iz sporočil RTK.	127
Slika 69: Zaradi majhnega števila referenčnih postaj so bile vse postaje omrežja GNSS združene v en grozd.	128
Slika 70: Privzete nastavitve parametrov za obdelavo omrežja GNSS so bile uporabljene tudi v lastnem omrežju.	128
Slika 71: Seznam proizvodov RTK v Leica GNSS Spider Network Serverju in nastavitve proizvoda RTK, ki omogoča samodejno izbiro najbližje referenčne postaje.	130
Slika 72: Postavitev antene med izvajanjem meritev na testni točki Brdo.	133
Slika 73: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	136
Slika 74: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	136
Slika 75: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	139
Slika 76: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	139
Slika 77: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	142
Slika 78: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	142

Slika 79: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	145
Slika 80: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.	146
Slika 81: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	148
Slika 82: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.	149
Slika 83: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	151
Slika 84: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	152
Slika 85: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	155
Slika 86: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	155
Slika 87: Prikaz stanja podatkovne povezave na zaslonu terenskega kontrolerja.	156
Slika 88: Podatki o referenčni postaji, ki jih premični sprejemnik razbere iz sporočil RTK, na zaslonu terenskega kontrolerja.	157
Slika 89: Daljinski dostop do programske opreme Leica GNSS Spider je med terensko izmero omogočal takojšnje diagnosticiranje morebitnih težav.	159
Slika 90: Zbrane meritve pri testu vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja, prikazane v programu Leica Geo Office.	160
Slika 91: Primerjava položajev pri različnih dolžinah trajanja meritve.	162
Slika 92: Primerjava višine pri različnih dolžinah trajanja meritve.	163
Slika 93: Aktivnost ionosfere na dan 17.09.2011. Pridobljeno na portalu omrežja SIGNAL.	166
Slika 94: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	167
Slika 95: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	167
Slika 96: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	169
Slika 97: Iz narave prekinitiev v tokovih podatkov z referenčnih postaj se lahko sklepa na potencialne vzroke.	170
Slika 98: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	172
Slika 99: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	172
Slika 100: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.	174

Slika 101: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	174
Slika 102: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	175
Slika 103: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.	175
Slika 104: Razpoložljivost satelitov in vrednost GDOP za 15.09.2011.	176
Slika 105: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat glede na dolžino trajanja meritve.	177
Slika 106: Primerjava natančnosti dobljenih koordinat z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.	178
Slika 107: Primerjava povprečnega števila satelitov (stolpni graf) in vrednosti GDOP (linijski graf) z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.	178
Slika 108: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.	179
Slika 109: Primerjava položajev z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.	180
Slika 110: Kumulativna razpoložljivost satelitov GPS, GLONASS ter GPS in GLONASS skupaj.	180
Slika 111: Razpoložljivost satelitov GPS na odprtem terenu (levo) in v ozki dolini, ki se razprostira v smeri vzhod-zahod (desno).	181
Slika 112: Razpoložljivost satelitov GPS in GLONASS na odprtem terenu (levo) in v ozki dolini, ki se razprostira v smeri vzhod-zahod (desno).	181
Slika 113: Prikaz tirnic satelitov GPS (vijolična), GLONASS (modra) ter GPS in GLONASS skupaj. Na slikah je v temno sivi barvi vrisana tudi ovira.	182
Slika 114: Pokazatelji kakovosti določitve položaja na zaslonu terenskega kontrolerja Leica Viva CS15.	189
Slika 115: Dnevniška datoteka mrežnega algoritma omogoča preprosto odkrivanje potencialnih vzrokov za težave v omrežju, saj za vsak trenutek prikazuje število vidnih satelitov, število satelitov, za katera so na voljo opazovanja in število fazno določenih satelitov.	196
Slika 116: Prikaz zgodovine stanja podatkovnih tokov omogoča upravljavcu omrežja GNSS preprosto odkrivanje potencialnih komunikacijskih težav.	201
Slika 117: Upravljavcu omrežja GNSS so sproti na voljo obsežni podatki o uporabnikih storitev RTK. To mu omogoča tudi enostavno nudenje tehnične podpore.	206

## LIST OF TABLES

Table 1: RTCM 3.x message structure (RTCM 10403.1:2009).	27
Table 2: First four groups of RTCM 3 message types.	28
Table 3: Additional groups of RTCM 3 message types.	29
Table 4: Characteristics of main GNSS error sources.	32
Table 5: Summary of the evaluation of four network RTK methods (Leica Geosystems, 2008b).	48
Table 6: Average theoretical bandwidths of three Network RTK methods. Adapted from (Janssen, 2009).	67
Table 7: Average bandwidths of three NRTK methods obtained from the CORSnet-NSW. Adapted from (Janssen, 2009).	67
Table 8: Surveying equipment used at the reference stations.	71
Table 9: Surveying equipment used in the field tests.	72
Table 10: Tracking analysis on the point Šentjakob.	100
Table 11: Tracking analysis on the point Šentvid.	102
Table 12: Tracking analysis on the point Brdo.	103
Table 13: Final coordinates and quality estimates of the point Šentjakob.	107
Table 14: Final coordinates and quality estimates of the point Šentvid.	107
Table 15: Final coordinates and quality estimates of the point Brdo.	108
Table 16: Tracking analysis on the point Arnače.	110
Table 17: Final coordinates and quality estimates of the point Arnače.	112
Table 18: List-price estimate of equipment and communication used.	113
Table 19: Mileage estimation.	115
Table 20: Connection parameters, data stream and protocol for raw data access.	122
Table 21: Proper handling of reference and rover antennas on the Leica Viva GNSS rover with respect to Null antenna settings in the network.	127
Table 22: RTK products of own GNSS network.	130
Table 23: Average amount of sent and received RTK data and required bandwidth estimation.	156
Table 24: Reference station data decoded from RTCM streams.	157
Table 25: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance from nearest reference station.	168
Table 26: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance from nearest reference station.	168
Table 27: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance from nearest reference station.	169
Table 28: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance from nearest reference station.	172
Table 29: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance from nearest reference station.	173
Table 30: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance from nearest reference station.	173
Table 31: Average time-to-fix from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.	175
Table 32: Largest residuals of all tests and for all distances from nearest reference station.	183

Table 33: Number of outliers from different RTK products.	183
Table 34: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, MAC TRM RTK product, 15 km distance from nearest reference station.	184
Table 35: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, SG GG TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	185
Table 36: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, SG TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	185
Table 37: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, MAC TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	186
Table 38: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, VRS TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	186
Table 39: Overview of outliers for the case: own network, NEAREST LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	188
Table 40: Overview of outliers for the case: own network, i-MAX LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	188
Table 41: Overview of outliers for the case: own network, ViRS LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.	188
Table 42: Reference stations included in a cell of SIGNAL network at different distances from nearest reference station.	190
Table 43: Reference stations included in a cell of own network at different distances from nearest reference station.	192
Table 44: Final coordinates of the point Arnače determined from different reference stations of SIGNAL network.	196
Table 45: Overview of test results at the point Arnače for the case: 10 s measurement interval, final coordinates determined from reference stations GSR1, Trebnje and Slovenj Gradec.	197
Table 46: Overview of test results at the point Arnače for the case: 10 s measurement interval, final coordinates determined from reference station Celje.	197



## LIST OF FIGURES

Figure 1: GPS IIF-3 satellite fitted inside payload fairing on top of Delta IV launch vehicle (Blau, 2012).	5
Figure 2: Power spectral density of GPS signal. Values show signal power sensed by the antenna on the Earth (left scale) and signal power in respect to thermal noise level (right scale).	7
Figure 3: Structure of navigation message frame.	8
Figure 4: GNSS receiver measures a phase difference between received and receiver-generated carrier phase. The observable does not contain the initial integer ambiguity $N(0)$ .	12
Figure 5: The double difference is the difference between two pairs of single difference phase observables to two satellites at the same epoch.	13
Figure 6: Procedure to solve a least-square adjustment problem in which some of the parameters are known to be integer.	19
Figure 7: GNSS surveying methods.	21
Figure 8: Reference system is earth-fixed coordinate system (Mozetič, 2006).	23
Figure 9: GNSS error sources.	32
Figure 10: Electric field vector of a circularly polarized electromagnetic wave has a constant magnitude but its direction changes in a rotary manner (Wikipedia skupnost).	35
Figure 11: State of the art GNSS reference antenna Leica AR20. The AR20 contains an inside 3D choke-ring (a) that brings leading edge multipath performance, and antenna element (b) which consists of an array of four individual planar radiating elements that provide superior circular polarization across all GNSS frequency bands and sub-millimeter phase centre stability (Walford, 2012).	37
Figure 12: Propagation of a wave. The group velocity is the velocity with which the overall shape of the wave's amplitudes (modulation) propagates through space. The group velocity is often thought of as the velocity at which energy or information is conveyed along a wave. The phase velocity is the rate at which the phase of the wave propagates in space.	42
Figure 13: RTK survey with a single reference station (a) and network RTK survey (b).	43
Figure 14: Concept of modeling distance dependent errors in a GNSS network.	44
Figure 15: Illustration of the characteristics of different concepts and strategies in determining the GNSS network solution: individualized network solution (a), nearest station solution (b) and unified network solution (c).	47
Figure 16: Sum of all errors represents corrections to observables determined at the reference station. In GNSS networks corrections are interpolated for the rover position. Traditional approach using single reference station (a) and three different network representation techniques are shown: area correction parameters – FKP (b), virtual reference station – VRS (b) and Master-Auxiliary concept – MAC (c). Adapted from (Wübbena, 2008).	49
Figure 17: In the Master-Auxiliary concept the network RTK server sends full raw observations for the master station and ambiguity reduced observations for a suitable subset of other stations – the auxiliary stations.	50

Figure 18: Example of reference station ambiguities (top) and common ambiguity level for all reference stations in a GNSS network (bottom). Adapted from (Euler in sod., 2002).	53
Figure 19: When zero difference processing is used it is necessary to constrain the ambiguities for one station (all satellites) and one satellite (all stations).	56
Figure 20: Calculation flow in GNSS networks: from data input to rover position solution. Different network approaches differ with respect to allocation of the processing steps either to the network processing centre or to the rover (Wanninger, 2008).	57
Figure 21: Linear FKP planes are represented by area correction parameters.	61
Figure 22: Relationship between MAC, FKP, i-MAX, VRS and PRS.	66
Figure 23: GNSS antennas at the national reference station GSR1 (left) and private reference station Geoservis, d.o.o. (right) on the roof of an office building Litijska cesta 45, Ljubljana.	69
Figure 24: The map of national and partner reference stations included in Slovene GNSS network SIGNAL.	70
Figure 25: Surveying equipment during field test. Black box in the middle is antenna splitter.	72
Figure 26: GNSS receiver Leica Viva GS10 – front side (left) and bottom side (right) with connection board, status indicators and battery compartments.	73
Figure 27: Field controllers Leica Viva CS10 (left) and CS15 (right).	75
Figure 28: GNSS antenna Leica AS10.	76
Figure 29: Screenshots of a field controller show connection settings, internet port settings and RTK rover settings.	77
Figure 30: Own GNSS network central computer of inside Geoservis' IT environment.	78
Figure 31: Screenshot of Leica GNSS Spider Network Server.	79
Figure 32: Relationship between cell, cluster and network in a GNSS reference station network.	80
Figure 33: Distributed installation of a data center in a corporate LAN with IT security in mind. Adapted from (Leica Geosystems, 2011).	81
Figure 34: Raw data stream status for all reference stations.	83
Figure 35: Map view of a GNSS network, clusters, automatically created cells and rover connections helps network operator to easily check network activities.	84
Figure 36: SpiderNET processing kernel activity is shown using color-coded satellite status bar graphs.	85
Figure 37: The creation of automatic cell and selection of a master station is continuously monitored and optimized.	87
Figure 38: Comprehensive status information of RTK rovers currently logged in the GNSS network.	89
Figure 39: Spider Business Center administrator's view allows users, products and services management.	90
Figure 40: Data flows between reference stations, users and Leica GNSS Spider server components. Adapted from (Leica Geosystems, 2011).	91
Figure 41: Leica SpiderWeb brings GNSS network to the internet.	92
Figure 42: Leica SpiderQC can be integrated into SpiderWeb for fully automatic provision of quality information in the network.	93
Figure 43: Leica SpiderQC automatically generates reports and plots which allow extensive quality control and performance analysis of GNSS reference stations and networks.	94
Figure 44: Locations of test points surrounded by nearest reference stations.	96

Figure 45: Map with nearest reference stations separations.	97
Figure 46: Ground marker and micro-location of the point Šentjakob.	97
Figure 47: Ground marker and micro-location of the point Šentvid.	98
Figure 48: Ground marker and micro-location of the point Brdo.	98
Figure 49: Horizon elevation angle on the point Šentjakob. Plot on the right shows also the impact of nearby power lines. Red circle represents 15° elevation angle.	99
Figure 50: Horizon elevation angle on the point Šentvid.	99
Figure 51: Horizon elevation angle on the point Brdo.	100
Figure 52: Satellite availability on the point Šentjakob.	101
Figure 53: Tracking information on the point Šentjakob.	101
Figure 54: Satellite availability on the point Šentvid.	103
Figure 55: Tracking information on the point Šentvid.	103
Figure 56: Satellite availability on the point Brdo.	104
Figure 57: Tracking information on the point Brdo.	105
Figure 58: Leica Geo Office software was used for post-processing and calculation of test points coordinates.	106
Figure 59: Baselines used in determination of final coordinates of the point Brdo.	106
Figure 60: Location of test point Arnače.	109
Figure 61: Surveying equipment during the field test on the point Arnače.	110
Figure 62: Satellite availability on the point Arnače.	111
Figure 63: Tracking information on the point Arnače.	112
Figure 64: Author during field work on the test point Šentjakob.	117
Figure 65: Authors own GNSS network established using Leica GNSS Spider software.	121
Figure 66: Rinex file product settings in GNSS Spider software.	123
Figure 67: Leica AR25 Rev.4 reference antenna incorporates Dorne-Margolin element and 3D choke-rings.	124
Figure 68: Rover can extract reference station antenna and receiver types directly from RTK messages.	127
Figure 69: All reference stations were assigned to a single cluster due to a small scale GNSS network.	128
Figure 70: For the realization of own GNSS network default processing parameters were used.	128
Figure 71: RT products tab in Leica GNSS Spider Network Server shows configured RTK products. Dialog box shows detailed settings of nearest RTK product.	130
Figure 72: GNSS antenna setup during field measurements on the point Brdo.	133
Figure 73: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance to the nearest reference station.	136
Figure 74: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance to the nearest reference station.	136
Figure 75: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance to the nearest reference station.	139
Figure 76: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance to the nearest reference station.	139
Figure 77: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance to the nearest reference station.	142
Figure 78: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance to the nearest reference station.	142

Figure 79: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance to the nearest reference station.	145
Figure 80: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance to the nearest reference station.	146
Figure 81: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance to the nearest reference station.	148
Figure 82: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance to the nearest reference station.	149
Figure 83: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance to the nearest reference station.	151
Figure 84: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance to the nearest reference station.	152
Figure 85: Position scatter from different RTK products of own network at 30 km distance to the nearest reference station.	155
Figure 86: Height errors from different RTK products of own network at 30 km distance to the nearest reference station.	155
Figure 87: RTK data link status shown on the field controller.	156
Figure 88: Reference station data extracted from RTK messages shown on the field controller.	157
Figure 89: Remote access allowed author a complete insight into the network activity in case of unpredicted problems with rover positioning during field tests.	159
Figure 90: Leica Geo Office software shows measurements collected during field test of the influence of measurement interval.	160
Figure 91: Position scatter at different lengths of measurement interval.	162
Figure 92: Height errors at different lengths of measurement interval.	163
Figure 93: Ionospheric activity for September 17, 2011. Retrieved from SIGNAL web portal.	166
Figure 94: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.	167
Figure 95: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.	167
Figure 96: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.	169
Figure 97: Nature of communication interruptions in reference station data streams can expose potential causes.	170
Figure 98: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.	172
Figure 99: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.	172
Figure 100: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.	174
Figure 101: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.	174
Figure 102: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.	175

Figure 103: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.	175
Figure 104: Satellite availability and GDOP values for September 15, 2011.	176
Figure 105: Comparison of standard deviations and RMS values from different lengths of measurement interval.	177
Figure 106: Comparison of standard deviations from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.	178
Figure 107: Comparison of average number of used satellites (bar graph) and GDOP values (line graph) from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.	178
Figure 108: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.	179
Figure 109: Position scatter from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.	180
Figure 110: Cumulative sum of available satellites for GPS-only, GLONASS-only and combined GPS+GLONASS.	180
Figure 111: GPS satellite availability in open sky (left) and narrow valley which extends in east-west (right).	181
Figure 112: Combined GPS+GLONASS satellite availability in open sky (left) and narrow valley which extends in east-west (right).	181
Figure 113: Sky plot for GPS-only (violet), GLONASS-only (blue) and combined GPS+GLONASS. Dark shade represents obstruction introduced by a valley in east-west direction.	182
Figure 114: Survey screen of Leica Viva CS15 field controller with different quality indicators that are presented to the operator during the measurements.	189
Figure 115: Cluster server log files allow network operator an easy way to discover potential sources of weak network performance. They store the history of visible, tracked and fixed satellites.	196
Figure 116: Raw data status allows simple discovery of potential communication weaknesses in GNSS networks.	201
Figure 117: Map view of active rovers and comprehensive rover status enables GNSS network operator to provide proper technical support to the field users.	206

## KRATICE

AIUB	nem. Astronomisches Institut Universität Bern
ARP	ang. Antenna Reference Point
BPSK	ang. Binary Phase Shift Keying
CD	ang. Correction Differences
CDMA	ang. Code Division Multiple Access
CIS	ang. Conventional Inertial System
CODE	ang. Center for Orbit Determination in Europe
CQ	ang. Coordinate Quality
CRC	ang. Cyclic Redundancy Check
CSCS	ang. Country Specific Coordinate System
CTS	ang. Conventional Terrestrial System
DCB	ang. Differential Code Bias
DGNSS	ang. Differential GNSS
DGPS	ang. Differential GPS
DMZ	ang. Demilitarized Zone
DOP	ang. Dilution of precision
DORIS	ang. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EPN	ang. EUREF Permanent Network
ETRS	ang. European Terrestrial Reference System
EUREF	ang. European Reference Frame
FDMA	ang. Frequency Division Multiple Access
FKP	nem. Flächenkorrekturparameter
FTTH	ang. Fibre-to-the-Home
GIM	ang. Global Ionospheric Maps
GIS	Geografski informacijski sistem
GGA	ang. Global Positioning System Fix Data; eden od standardnih stavkov NMEA, ki vsebuje podatek o položaju
GLONASS	rus. Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema
GNSS	ang. Global Navigation Satellite System
GPRS	ang. General Packet Radio Services
GPS	ang. Global Positioning System
GSM	ang. Global System for Mobile Communications
HTTP	ang. Hypertext Transfer Protocol
HOW	ang. Handover
IAG	ang. International Association of Geodesy
ICB	ang. Inter-Channel Bias
ICRF	ang. International Celestial Reference Frame
ICRS	ang. International Celestial Reference System
IERS	ang. International Earth Rotation Service
IGS	ang. International GNSS Service
IGU	ang. IGS Ultra Rapid
IKT	Informacijsko-komunikacijske tehnologije
i-MAX	Individualizirani mrežni popravki RTK

IONEX	ang. Ionosphere Exchange
IP/MPLS	ang. Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching
ITRF	ang. International Terrestrial Reference Frame
ITRS	ang. International Terrestrial Reference System
LAMBDA	ang. Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LB2	ang. Leica Binary 2
MAC	ang. Master-Auxiliary Concept
MAX	Mrežni popravki RTK po konceptu MAC
NGS	ang. National Geodetic Survey
NMEA	ang. National Marine Electronics Association
NOVA	ang. Network Online Visualisation of Accuracy
NRTK	ang. Network RTK
NTRIP	ang. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OSR	ang. Observation-Space Representation
OTF	ang. On-the-Fly
PCO	ang. Phase Center Offset
PCV	ang. Phase Center Variations
PLL	ang. Phase Locked Loop
PPP	ang. Precise Point Positioning
PRN	ang. Pseudo random noise
PRS	ang. Pseudo-Reference Station
QoS	ang. Quality of Service
RMS	ang. Root Mean Square
RTCM	ang. Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	ang. Real-time kinematic
SLR	ang. Satellite Laser Ranging
SSR	ang. State-Space Representation
TCP/IP	ang. Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TEC	ang. Total electron content
TLM	ang. Telemetry
TTF	ang. Time to fix
VLBI	ang. Very Long Baseline Interferometry
VPN	ang. Virtual Private Network
VRS	ang. Virtual Reference System
WGS	ang. World Geodetic System
ZHD	ang. Zenith Hydrostatic Delay
ZWD	ang. Zenith Wet Delay

## 1 UVOD

### 1.1 Opis problema in izhodišča

Ocenjuje se, da je danes kar 95% vseh podatkov povezanih s prostorom (Perkins, 2010). V veliki večini primerov se položaj določa z uporabo globalnih satelitskih navigacijskih sistemov (ang. Global Navigation Satellite System, GNSS). Brez uporabe GNSS si je danes težko zamišljati delovanje velikega dela gospodarstva in znanosti – od storitev v prometu in logistiki, spremljanja avtobusnega in železniškega prometa, prenosa točnega časa, napovedovanja vremena, spremljanja aktivnosti zemeljske skorje, do vsakodnevnih meritev v geodeziji, gradbeništvu in pri terenskem zajemu podatkov za potrebe GIS. Prav pri vseh aktivnostih pa je čutiti neprestano potrebo po višanju kakovosti določitve položaja.

Določitev položaja s pomočjo GNSS temelji na trilateraciji – postopku določitve položaja z merjenjem razdalj do točk z znanim položajem. Pri uporabi GNSS se lahko razdalje med sateliti in sprejemniki določijo na osnovi opazovanj različnih količin v okviru satelitskega signala – merskih kod, faz nosilnega valovanja in Dopplerjeve frekvence sprejetega valovanja.

Nosilna valovanja, skupaj z informacijami nanesenimi nanje, predstavljajo satelitski signal. Nosilna valovanja so tako sredstvo za prenos informacij od satelita do sprejemnika. Frekvence nosilnih valovanj, način tvorjenja merskih kod in vrste modulacij so pri vseh satelitskih navigacijskih sistemih izbrane zelo domiselno. Poleg velike količine podatkov, ki jih morajo signali prenašati, morajo biti tudi čim bolj neobčutljivi za vpliv Zemljine atmosfere. Izbira psevdo-naključnih merskih kod s specifičnimi avto- in križno-korelacijskimi lastnostmi ter modulacija, s katero so nanesene na nosilno valovanje, omogoča učinkovito demodulacijo šibkega signala, sprejetega na Zemlji, tudi če je njegova spektralna gostota moči pod nivojem termičnega šuma. Z izbiro oblike in razporeditvijo tirnic satelitov je zagotovljena optimalna razpoložljivost kjer koli na Zemlji, vpliv motilnih dejavnikov na tirnico pa je približno enak za vse satelite, tako da se vzdržuje stabilna konstelacija (Köhne, Wößner, 2009).

Vpliv na satelitski signal z izvorom v Zemljini atmosferi razdelimo na vpliv ionosfere in troposfere. Poleg tega pa na satelitski signal vplivajo še pogreški tirnic satelitov, pogreški satelitovih in sprejemnikovih ur, pogreški elektronskih sestavov, večpotje ter pogreški faznih centrov anten (Leick, 2004).

Za določitev položaja z najvišjo, geodetsko točnostjo se uporabljajo relativne metode določitve položaja GNSS z uporabo različnih vrst opazovanj, pri čemer je en sprejemnik referenčni, z drugim pa se določa položaj novih točk. Sprejemnik, katerega položaj se določa, lahko med opazovanji miruje ali se premika. Položaj sprejemnika se lahko določi v času izvajanja meritev ali po zaključku meritev.

Pri vseh relativnih metodah določitve položaja se izkorišča dejstvo, da so vplivi na opazovanja prostorsko in časovno korelirani, vendar pa razdalja med referenčnim in premičnim sprejemnikom ne sme preseči nekaj deset kilometrov, če se zahteva hitra in zanesljiva določitev položaja. Omejitve izvira iz vplivov na opazovanja GNSS, ki so odvisna od oddaljenosti med obema sprejemnikoma in se v postopkih tvorjenja faznih razlik ne izničijo v celoti. Te vplive pa je mogoče zanesljivo modelirati s pomočjo opazovanj množice referenčnih sprejemnikov GNSS, ki obkrožajo premični sprejemnik.

Motivi za vzpostavljanje omrežij GNSS so, poleg uspešnejšega modeliranja vplivov na opazovanja, tudi ekonomski. Wanninger (2008) navaja, da je za območja velikosti 10.000 km<sup>2</sup> potrebnih 30



referenčnih postaj GNSS, vendar samo 5-10 referenčnih postaj, če so le-te povezane v enotno omrežje. Zato vzpostavitev omrežij GNSS pomeni velike prihranke tako za upravljavce kot za uporabnike omrežja.

Izmera RTK v omrežju referenčnih postaj GNSS zagotavlja kakovostno določitev položaja s pomočjo skupne obdelave vseh opazovanj vseh sprejemnikov v omrežju, modeliranja sistematičnih vplivov na opazovanja (predvsem ionosfere, troposfere in pogreškov tirnic) in predstavitev teh vplivov kot popravkov RTK za premične sprejemnike (Janssen, 2009).

Na tržišču so na voljo programske rešitve za upravljanje omrežij GNSS, ki vključujejo modeliranje vplivov na opazovanja v omrežjih GNSS ter njihovo predstavitev z različnimi koncepti: z navideznimi referenčnimi postajami – Virtual Reference Station (VRS), psevdo referenčnimi postajami – Pseudo-Reference Station (PRS), ploskovnimi popravki – Flächenkorrekturparameter (FKP) ter koncept Master-Auxiliary (MAC) z mrežnimi popravki MAX in individualiziranimi mrežnimi popravki i-MAX.

## 1.2 Cilji in metode dela

V sklopu magistrskega dela sta bila izpostavljena dva vodilna koncepta omrežij GNSS, ki omogočata izmero RTK v omrežjih GNSS – VRS (Vollath in sod., 2000) in MAC (Euler in sod., 2001), in sicer tako s stališča upravljavca omrežja GNSS kot s stališča uporabnikov premičnih sprejemnikov GNSS. Cilj praktičnega dela je bil vzpostavitev podatkovnega centra, v katerem je bilo realizirano lastno omrežje GNSS, ki je bilo v največji meri podobno slovenskemu državnemu omrežju SIGNAL, ter analiza zmogljivosti obeh omrežij s stališča kakovosti določitve položaja ob uporabi različnih proizvodov RTK v odvisnosti od oddaljenosti od najbližje referenčne postaje ter vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja. Pri tem je bila posebna pozornost namenjena odkrivanju morebitnih pogreškov v omrežjih. Preverila se je tudi pravilnost vsebine sporočil RTCM, ki sta jih omrežji posredovali premičnim sprejemnikom, ter ocenila potrebna pasovna širina v primeru različnih proizvodov RTK.

Na območju, ki ga pokriva državno omrežje skupaj s partnerskimi referenčnimi postajami iz sosednjih držav, je bilo vzpostavljeno testno območje, znotraj katerega je bil premični sprejemnik približno enako oddaljen od okoliških referenčnih postaj. Za oddaljenost od najbližje referenčne postaje so bile izbrane vrednosti: 5 km, 15 km in 30 km. Testne točke so bile izbrane optimalno, tako da je na kakovost določitve položaja v največji meri vplivalo samo omrežje GNSS.

Na vsaki testni točki so bile opravljene 24-urne meritve RTK z 1-sekundnim intervalom shranjevanja, po vsaki uspešni določitvi fazne nedoločenosti pa je sprejemnik rešitev samodejno zavrgel in začel nov, neodvisen postopek inicializacije. Na ta način so bili pridobljeni dovolj veliki vzorci meritev, da so le-ti reprezentativni. Terenske meritve so se hkrati izvajale s štirimi enakimi sprejemniki GNSS, ki so bili preko antenskega delilnika povezani z isto anteno, da je bila zagotovljena popolna primerljivost rezultatov. V prvem testu so se primerjali štirje različni proizvodi RTK državnega omrežja SIGNAL, v drugem testu so se primerjali mrežni proizvodi RTK po konceptih VRS in MAC med državnim in lastnim omrežjem GNSS, v tretjem testu so se primerjali štirje različni mrežni proizvodi lastnega omrežja GNSS, v četrtem testu pa so štirje sprejemniki hkrati sprejemali iste popravke RTK, za določitev položaja pa so opravljali meritve z dolžino trajanja 10 sekund, 1 minute, 5 minut in 15 minut.

Rezultati izmere RTK so bili analizirani s stališča različnih kazalnikov kakovosti določitve položaja: ocene natančnosti in točnosti, faktorjev DOP ter števila satelitov, vključenih v izračun položaja. Na osnovi izbranega kriterija je bilo določeno število grobo pogrešenih meritev, povprečen čas za inicializacijo ter vpliv dolžine trajanja meritve na posamezni točki na kakovost določitve položaja.

Na podlagi preučitve prednosti in slabosti različnih mrežnih konceptov in analize kakovosti pridobljenih položajev v omrežjih referenčnih postaj GNSS so v zaključkih podana priporočila tako upravljavcem kot uporabnikom omrežij GNSS. Izpostavljene so nekatere šibke točke v državnem omrežju SIGNAL ter priložnosti za izboljšave. Za uporabnike aktivnih omrežij GNSS pa so podana priporočila glede izbire ustreznih mrežnih konceptov in proizvodov RTK, ki jim bodo omogočala pridobitev optimalnih rezultatov izmere RTK v omrežjih.

Pridobljene izkušnje in ugotovitve pri postavitvi lastnega omrežja GNSS bodo omogočale uspešno vzpostavljanje lokalnih in regionalnih omrežij GNSS z različnimi storitvami za uporabnike, nadgradnjo obstoječih omrežij, uspešno vgradnjo omrežij GNSS v drugih primerih uporabe, na primer lokalnih omrežij za potrebe spremljanja premikov in deformacij naravnega in grajenega okolja, ter ne nazadnje zagotavljanje kakovostne tehnične podpore in produktivno sodelovanje z lastniki in upravljavci državnega omrežja SIGNAL.

### **1.3 Struktura magistrskega dela**

Splošnemu opisu GNSS v 2. poglavju najprej sledi predstavitev opazovanj kode in faze nosilnega signala ter načini določitve položaja s satelitskimi navigacijskimi sistemi. Predstavljen je koncept faznih razlik, kratko pa so opisane tudi metode izmere GNSS ter z GNSS povezani koordinatni sistemi in koordinatni sestavi. Svoje podpoglavje je namenjeno opisu standarda RTCM 3.x za podporo relativnim metodam izmere. V nadaljevanju so predstavljeni vplivi na opazovanja GNSS in koncept omrežij GNSS. Podrobneje je obdelan koncept Master-Auxiliary, pri katerem je izpeljan postopek tvorjenja popravkov RTK in način obdelave popravkov na premičnem sprejemniku. Primerjalno so opisani tudi drugi pristopi – VRS, PRS, FKP in i-MAX.

V 3. poglavju je podrobno opisana programska oprema Leica GNSS Spider, s katero je bilo realizirano lastno omrežje GNSS. Predstavljena je izbira točk, na katerih so se izvajale terenske meritve, analizirana je njihova primernost in opisan način določitve koordinat. V tem poglavju je predstavljena tudi uporabljena merska oprema, podani pa so tudi ekonomski vidiki raziskave.

4. poglavje opisuje izbiro testov, ki so bili opravljeni v sklopu terenske izmere, podana so merila za ocenjevanje kakovosti meritev ter način priprave rezultatov izmere za potrebe nadaljnje analize. Opisan je postopek vzpostavitve lastnega omrežja GNSS, parametri delovanja omrežja ter predstavljeni proizvodi RTK. Osrednji del poglavja je namenjen predstavitvi rezultatov izmere.

V poglavju 5 so predstavljeni izsledki analize. Podane so primerjave rezultatov ob uporabi različnih proizvodov RTK obeh omrežij, opisane so prednosti uporabe satelitov GLONASS, pregledani pa so tudi vsi grobi pogreški meritev. Ker se je med izmero beležila količina prenesenih podatkov RTK, je bila analizirana tudi potrebna pasovna širina za prenos popravkov RTK.

Ugotovitve so povzete v 6. poglavju, kjer so podana priporočila za uporabnike omrežij GNSS in priložnosti za izboljšave omrežja SIGNAL.

--- Ta stran je namenoma prazna ---

## 2 PREGLED PODROČJA

### 2.1 Na kratko o GNSS

#### 2.1.1 Osnovna zamisel

Celoten sistem GNSS sestavljajo 3 segmenti. Vesoljski segment predstavlja konstelacija satelitov GNSS, ki krožijo okoli Zemlje in oddajajo signale. Kontrolni segment sestavljajo kontrolne postaje na Zemlji, ki so zadolžene za spremljanje delovanja in upravljanje s celotnim sistemom. Uporabniški segment vključuje vse sprejemnike ter programsko opremo za določanje položaja, navigacijo in prenos točnega časa. Tem tradicionalnim segmentom se danes dodaja tudi četrti, zemeljski segment, ki vključuje civilna omrežja postaj GNSS, ki zagotavljajo uporabniškemu segmentu številne storitve – od realizacije koordinatnih sistemov, pridobivanja preciznih efemerid, do realno-časovnih podatkov za podporo metodam izmere DGNS in RTK.

Določitev položaja s pomočjo GNSS temelji na trilateraciji, postopku določitve položaja z merjenjem razdalj do točk z znanimi koordinatami. Satelit pri tem predstavlja točko v prostoru z znanimi koordinatami. Sprejemnik lahko izračuna njegov položaj iz podatkov navigacijskega sporočila, ki jih oddaja vsak satelit, ter točnega časa. Za določitev položaja je treba izmeriti 4 razdalje do 4 satelitov. Poleg navigacijskega sporočila pa signali s satelitov GNSS vsebujejo še številne druge kode (C/A, P(Y), L2C, L5C), ki so nanese na različna nosilna valovanja, navadno tudi več kod na istem nosilnem valovanju, zato morajo biti le-ta primerno modulirana.

Sodoben satelit GNSS, na primer GPS Block IIF, kakršne izstreljujejo od maja 2010, tehta 1.6 tone, je visok 4 m, razpon solarnih panelov pa znaša dobrih 13 m (slika 1). Poleg omenjenih civilnih in vojaških kod na nosilnih valovanjih L1 in L2 oddaja tudi novi vojaški kodi L1M in L2M, drugo civilno kodo L2C ter tretji civilni signal L5. Dodatno vsebuje tudi sistem za ugotavljanje jedrskih eksplozij. Pričakovana življenjska doba znaša 12 let, zato ima satelit vgrajen tudi zmogljiv procesor, ki omogoča nadgrajevanje systemske programske opreme z Zemlje (Boeing) (Wade).



Slika 1: Satelit GPS IIF-3, nameščen v prostoru za tovor na vrhu nosilne rakete Delta IV (Blau, 2012).

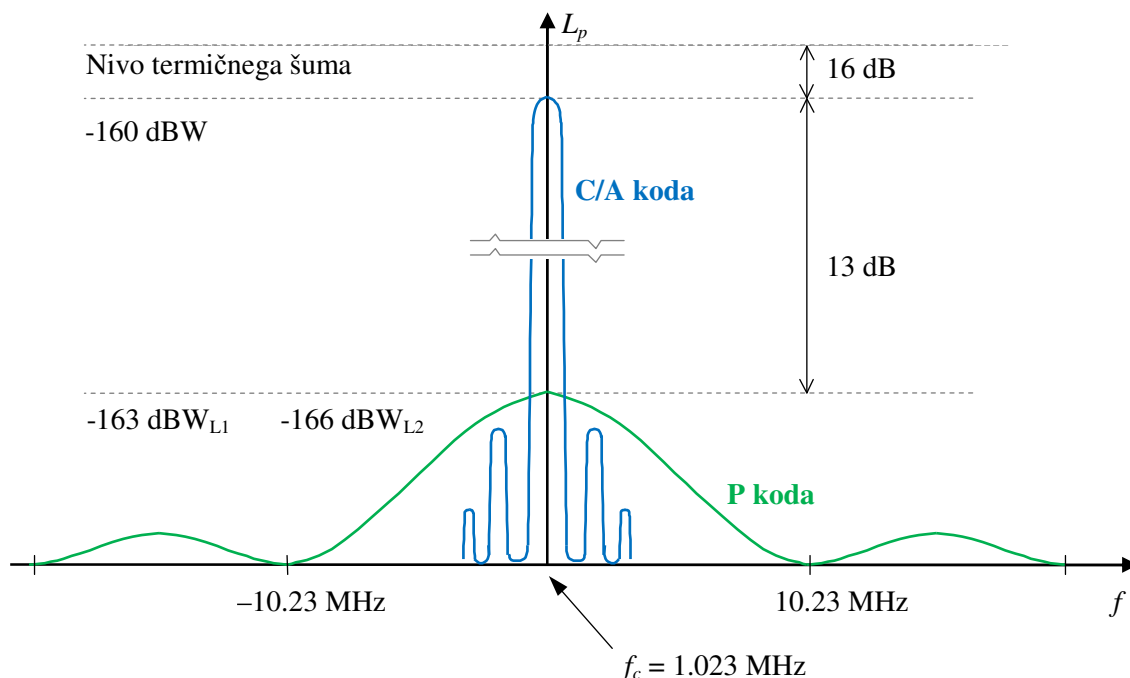
*Figure 1: GPS IIF-3 satellite fitted inside payload fairing on top of Delta IV launch vehicle (Blau, 2012).*

Sateliti GPS so razporejeni v 6 orbitalnih ravninah s  $55^\circ$  inklinacijo proti ekvatorju. V vsaki orbiti so nominalno 4 sateliti, ki pa niso enakomerno razporejeni. Razporeditev satelitov in orbit je takšna, da so na vsaki točki na Zemlji vedno vidni vsaj 4 sateliti, hkrati pa takšna razporeditev zagotavlja tudi stabilno konstelacijo, saj so vplivi na tirnice (na primer Sončev veter, gravitacija) približno enako veliki za vse satelite (Köhne, Wößner, 2009).

Frekvence nosilnih valovanj, kode in modulacije so izbrane zelo domiselno. Pri izbiri frekvenc nosilnih valovanj so bila upoštevana številna dognanja: na primer za frekvence nad 2 GHz bi bile potrebne usmerjene antene, vpliv ionosfere je najmanjši za valovanja s frekvencami med 100 MHz in 10 GHz, vpliv na hitrost razširjanja valovanja je tem večji, čim nižja je frekvenca, modulacijske kode zahtevajo veliko pasovno širino, hitrost razširjanja valovanja pa ne sme biti odvisna od vremenskih pojavov, kot so dež, sneg ali oblaki. Frekvence so tako izbrane s stališča optimalnega razširjanja elektromagnetnega valovanja skozi medij, še posebej, da je vpliv atmosferske refrakcije na signal najmanjši (Köhne, Wößner, 2009). Sateliti GPS tako oddajajo signale na treh nosilnih valovanjih, in sicer L1 s frekvenco 1575.42 MHz (valovna dolžina 19.03 cm), L2 s frekvenco 1227.60 MHz (valovna dolžina 24.42 cm), tretji civilni signal L5 pa ima frekvenco nosilnega valovanja 1176.45 MHz (valovna dolžina 25.48 cm). Vse frekvence signalov GPS izhajajo iz osnovne frekvence 10.23 MHz, ki jo vzdržujejo časovni standardi na satelitih.

Kode PRN, ki so nekakšen podpis vsakega satelita GPS, so psevdo-naključne kode iz skupine skoraj ortogonalnih, Goldovih kod. Kode PRN, ki sicer ne nosijo informacije, sestavlja zaporedje na videz naključnih impulzov, ki se ustvari v pomičnem registru. Njihova navidezna naključnost omogoča, da avtokorelacijska funkcija prikaže izrazit vrh samo pri popolni usklajenosti v sprejemniku ustvarjenega in s satelita sprejetega signala, križna korelacija med različnimi kodami pa je majhna. To je ključ do ocene razdalje od satelita na osnovi opazovanj kode.

Informacijske kode (navigacijsko sporočilo) in kode za razširjanje frekvenčnega spektra (PRN) so nanesene na sinusno nosilno valovanje z binarno fazno modulacijo (ang. Binary Phase Shift Keying, BPSK). Signal zato zavzema večjo pasovno širino (pasovno širino kode), kot je to minimalno potrebno za prenos informacije, razširjanje spektra za nekajkratni velikostni razred pa se doseže s signalom, ki je neodvisen od informacijskega signala. Ker vsak satelit oddaja nosilni signal moduliran s svojo različico kode PRN, si lahko vsi delijo isti frekvenčni pas. Tak način sodostopa do komunikacijskega kanala se imenuje kodni sodostop (ang. Code Division Multiple Access, CDMA). Frekvenčni spekter signala GPS je torej močno razširjen, njegova amplituda pa se zmanjša, tako da je na površju Zemlje približno 16 dB pod nivojem termičnega šuma, kot to prikazuje slika 2 (Leick, 2004).



Slika 2: Spektralna gostota moči signala GPS. Na levi skali so prikazane moči, ki jih zazna antena na Zemlji v dBW (decibeli glede na 1 W moči oddajnika), na desni pa razmerje moči glede na nivo termičnega šuma.

Figure 2: Power spectral density of GPS signal. Values show signal power sensed by the antenna on the Earth (left scale) and signal power in respect to thermal noise level (right scale).

### 2.1.2 Razdalja od satelita

Določitev razdalje od satelita poteka preko merjenja časa potovanja signala od satelita do sprejemnika.

$$P_k^p = (t_k - t^p)c,$$

pri čemer je

$t_k$  čas sprejema signala,

$t^p$  čas oddaje signala s satelita,

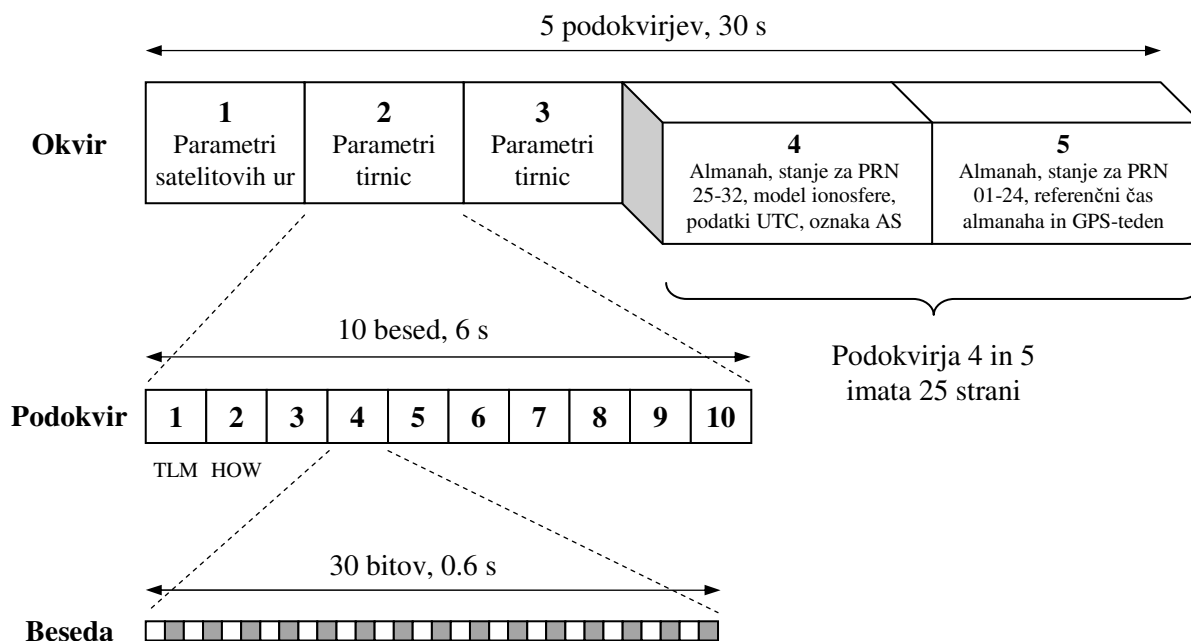
$c$  hitrost svetlobe.

Ker znaša velika polos orbite satelita GPS približno 26600 km, je čas potovanja približno 70 ms.

Elektromagnetno valovanje se na svoji poti razširja skozi vesolje in skozi Zemljino atmosfero s hitrostjo blizu svetlobne. Signal, ki ga zazna antena na Zemlji, se ojači in vodi do sprejemnika, ki v nominalno istem času ustvarja natančen posnetek istega signala. V sprejemniku ustvarjena replika signala ter dejansko sprejeti signal s satelita se v sprejemniku primerjata. Sprejemnik interno ustvarjen signal v fazno sklenjeni zanki (ang. Phase Locked Loop, PLL) premika toliko časa, da sta poravnana (križna korelacija doseže vrh), in na ta način določi čas potovanja signala.

Koda PRN se ponovi vsako 1 ms. To pri hitrosti razširjanja elektromagnetnega valovanja  $c$  predstavlja približno 300 km, kar pomeni, da se koda vsakih 300 km ponovi, zato je psevdo-razdalja nedoločena na 300 km. Sprejemnik zato določi začetni približek za čas potovanja signala s pomočjo

navigacijskega sporočila. Za to mora najprej z avtokorelacijo iz nosilnega signala odstraniti kodo PRN, nato pa dekodirati navigacijsko sporočilo. Navigacijsko sporočilo je urejeno v logične enote, ki se imenujejo okvirji. Glavni okvir obsega 25 ponovitev podokvirov 1, 2 in 3 ter 25 strani podokvirjev 4 in 5, kar skupaj znaša 37.500 bitov. Celotno navigacijsko sporočilo se ob hitrosti prenosa 50 Hz tako prenese v 12,5 minutah. Struktura navigacijskega sporočila je prikazana na sliki 3 (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2004).



Slika 3: Struktura navigacijskega sporočila GPS.

Figure 3: Structure of navigation message frame.

Na začetku vsakega podokvira navigacijskega sporočila je beseda TLM (ang. Telemetry), ki omogoča sinhronizacijo sprejemnika z navigacijskim sporočilom in nato dekodiranje le-tega. Sledi ji beseda HOW (ang. Hand-over), ki omogoča sprejemniku, da ugotovi, kateri podokvir sprejema. HOW vsebuje Z-števec<sup>1</sup> (ang. Z-count), iz katerega sprejemnik dekodira čas oddaje prvega bita naslednjega podokvira.

Podobno, kot se razdalja od satelita lahko oceni na osnovi korelacije kode sprejetega in v sprejemniku ustvarjenega signala, se lahko primerjata tudi fazi nosilnih valovanj.

### 2.1.3 Določitev absolutnega položaja iz opazovanj kode

Elektromagnetno valovanje je zaradi svojega razširjanja skozi Zemljino atmosfero podvrženo različnim vplivom. Najizrazitejša sta vpliva ionosfere in troposfere, ki daljšata čas potovanja signala od satelita do sprejemnika. Dodatno je izračunan čas potovanja signala podvržen tudi pogreškom ure v satelitu in sprejemniku, pogreškom elektronskih sestavov, večpotju in pogrešku faznega centra anten. Zato se izmerjena razdalja imenuje psevdo-razdalja.

<sup>1</sup> Prvih 10 bitov 29-bitnega Z-števca predstavlja število tednov (ang. GPS Week) od ničelnega časa GPS, to je od polnoči, 6. januarja 1980. Zadnjih 19 bitov pa predstavlja čas v tednu (ang. Time of Week, TOW), ki je določen kot število epoh X1 (1.5 s) od začetka GPS-tedna (Leick, 2004).

V splošnem se kodna psevdo-razdalja med sprejemnikom  $k$  in satelitom  $p$  zapiše

$$P_k^p = \rho_k^p - (dt_k - dt^p)c + I_k^p + T_k^p + dr^p + \varepsilon_p,$$

pri čemer so

$P_k^p$  kodna psevdo-razdalja,

$\rho_k^p$  geometrična razdalja med satelitom in sprejemnikom,

$dt_k$  pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure,

$dt^p$  pogrešek urinega stanja satelitove ure,

$c$  hitrost svetlobe,

$T_k^p$  vpliv troposferske refrakcije na razširjanje signala,

$I_k^p$  vpliv ionosferske refrakcije na razširjanje signala,

$dr^p$  pogrešek tirnice satelita (normiran v smeri satelit-sprejemnik) ter

$\varepsilon_p$  drugi vplivi na opazovanja kot na primer zakasnitve v elektronskih sestavih satelita in sprejemnika, pogrešek zaradi večpotja signala in slučajni pogreški meritve (šum).

Za vsak trenutek so v primeru opazovanj kode 4 neznanke (3 koordinatne neznanke in popravek urinega stanja sprejemnikove ure), v primeru opazovanj faze pa je število neznank  $3 + 1 + n$ , kjer  $n$  predstavlja po eno neznano začetno število celih valov za vsak opazovani signal.

Geometrična razdalja med sprejemnikom  $k$  in satelitom  $p$  je

$$\rho_k^p = \sqrt{(x_k - x^p)^2 + (y_k - y^p)^2 + (z_k - z^p)^2} = f(x_k, y_k, z_k),$$

pri čemer sta

$r_k = (x_k, y_k, z_k)$  položaj sprejemnika in

$r_p = (x^p, y^p, z^p)$  položaj satelita.

Za uporabo geometrične razdalje v linearnem matematičnem modelu izravnave je potrebno izraz najprej linearizirati. Položaj sprejemnika  $k$  se zapiše kot vsota približnega položaja  $r_{k0}$  in popravkov približnega položaja  $\Delta r_k$

$$r_k = r_{k0} + \Delta r_k.$$

Enačba za geometrično razdaljo se nato razvije v Taylorjevo vrsto v okolici približnega položaja sprejemnika, pri čemer se obdrži samo linearne člene



$$\begin{aligned} f(x_k, y_k, z_k) &= f(x_{k0} + \Delta x_k, y_{k0} + \Delta y_k, z_{k0} + \Delta z_k) = \\ &= f(x_{k0}, y_{k0}, z_{k0}) + \left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial x_k} \right|_{r_0} \Delta x_k + \left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial y_k} \right|_{r_0} \Delta y_k + \left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial z_k} \right|_{r_0} \Delta z_k, \end{aligned}$$

posamezni parcialni odvodi po vseh neznankah v okolici približnega položaja sprejemnika pa so

$$\left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial x_k} \right|_{r_0} = -\frac{x^p(t) - x_{k0}}{\rho_{k0}^p(t)},$$

$$\left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial y_k} \right|_{r_0} = -\frac{y^p(t) - y_{k0}}{\rho_{k0}^p(t)},$$

$$\left. \frac{\partial f(x_k, y_k, z_k)}{\partial z_k} \right|_{r_0} = -\frac{z^p(t) - z_{k0}}{\rho_{k0}^p(t)}.$$

Opazovanja so z neznankami v modelu povezana preko nelinearne funkcije

$$P_k^p = f_p(x_k, y_k, z_k, dt_k).$$

Poenostavljeno (brez upoštevanja neodstranjenih vplivov na opazovanja) in z upoštevanjem zgornjega se lahko zapiše

$$P_k^p = \rho_k^p - cdt_k = \rho_{k0}^p - \frac{x^p - x_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta x_k - \frac{y^p - y_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta y_k - \frac{z^p - z_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta z_k - cdt_k.$$

Ker nobena opazovanja niso popolna, velja relacija

$$\hat{P}_k^p = P_k^p + v_k^p,$$

pri čemer je  $v_k^p$  popravek opazovanj.

Tako se lahko zapiše enačba popravkov

$$v_k^p + \frac{x^p - x_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta x_k + \frac{y^p - y_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta y_k + \frac{z^p - z_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta z_k + cdt_k = \rho_{k0}^p - P_k^p.$$

Za vsako opazovano psevdo-razdaljo med sprejemnikom  $k$  in satelitom  $p$  se lahko zapiše po ena enačba popravkov. Če je na voljo  $i$  opazovanj, se enačbe popravkov zapišejo v matrični obliki

$$v + B\Delta = d - l = f,$$

kjer je

$$v = \begin{bmatrix} v_{p1} \\ v_{p2} \\ \vdots \\ v_{pi} \end{bmatrix} \text{ vektor popravkov opazovanj kode (psevdo-razdalj),}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \\ \Delta z_k \\ dt_k \end{bmatrix} \text{ vektor neznank,}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{x^1 - x_{k0}}{\rho_{k0}^1} & \frac{y^1 - y_{k0}}{\rho_{k0}^1} & \frac{z^1 - z_{k0}}{\rho_{k0}^1} & C \\ \frac{x^2 - x_{k0}}{\rho_{k0}^2} & \frac{y^2 - y_{k0}}{\rho_{k0}^2} & \frac{z^2 - z_{k0}}{\rho_{k0}^2} & C \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x^i - x_{k0}}{\rho_{k0}^i} & \frac{y^i - y_{k0}}{\rho_{k0}^i} & \frac{z^i - z_{k0}}{\rho_{k0}^i} & C \end{bmatrix} \text{ matrika numeričnih koeficientov neznank,}$$

$$f = \begin{bmatrix} \rho_{k0}^1 - P_k^1 \\ \rho_{k0}^2 - P_k^2 \\ \vdots \\ \rho_{k0}^i - P_k^i \end{bmatrix} \text{ pa je vektor odstopanj.}$$

Če je sistem predoločen, se ga reši po metodi najmanjših kvadratov, tako da so neznanke

$$\Delta = N^{-1} \cdot t = (B^T P B)^{-1} \cdot B^T P f,$$

kofaktorska matrika neznank pa je

$$Q_{\Delta\Delta} = (B^T P B)^{-1}.$$

$P$  je matrika uteži, ki je v primeru, da so opazovanja nekorelirana in enake natančnosti, enotska.

Popravke približnih vrednosti neznank (koordinat sprejemnika  $k$ ) se določi iterativno, končna vrednost položaja pa je

$$r_k = r_{k0} + \Delta r_k = (x_{k0} + \Delta x_k, y_{k0} + \Delta y_k, z_{k0} + \Delta z_k).$$

### 2.1.4 Fazne razlike in kombinacije opazovanj

Podobno kot enačba psevdo-razdalje se zapiše tudi enačba opazovanj faze (fazna psevdo-razdalja)<sup>2</sup>

$$\Phi_k^p = \rho_k^p - (dt_k - dt^p)c - I_k^p + T_k^p + N_k^p \lambda + dr^p + \varepsilon_{\Phi},$$

pri čemer so

$\Phi_k^p$  fazna psevdo-razdalja, izražena v metrih,

$\lambda$  valovna dolžina nosilnega valovanja in

$N_k^p$  neznan število celih valov oziroma fazna nedoločenost (ang. Ambiguity).

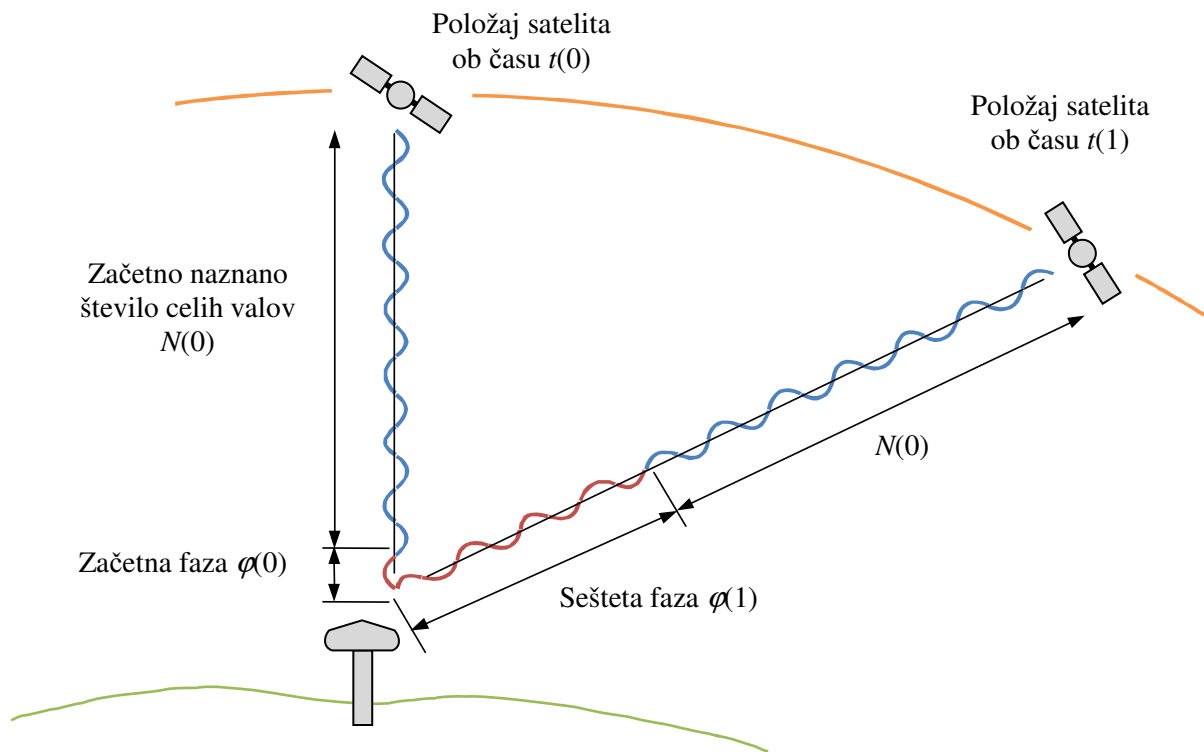
Problem fazne psevdo-razdalje je v nepoznavanju začetne vrednosti števila celih valov signala od satelita do sprejemnika. Sprejemnik lahko zazna fazo le znotraj ene valovne dolžine ter beleži šesteto fazo, to je akumulirane cele periode signala od začetka sledenja, kot je prikazano na sliki 4. Vendar pa

<sup>2</sup> Enačba opazovanja faze izhaja iz dejstva, da je fazna psevdo-razdalja enaka razliki v sprejemniku ustvarjene in s satelita sprejete faze nosilnega valovanja ter naznanega števila celih valov signala od satelita do sprejemnika, pomnožena z valovno dolžino nosilnega valovanja

$$\Phi_k^p = (\varphi_k - \varphi^p)\lambda + N_k^p \lambda.$$

Ker sta frekvenci v sprejemniku ustvarjenega signala in s satelita sprejetega signala zaradi Dopplerjevega učinka različni (medsebojno gibanje satelit-sprejemnik), se v sprejemniku sestavi novo valovanje (ang. Beat), katerega faza in frekvenca sta razliki obeh izvornih valovanj.

so opazovanja faze kar za faktor 100 natančnejša od opazovanj kode (ločljivost < 1% valovne dolžine). Sodoben geodetski sprejemnik GNSS tako lahko določi položaj kode na 2 cm natančno, faze pa na 0.2 mm natančno (Leica Geosystems, 2008).



Slika 4: Sprejemnik GNSS meri fazno razliko med sprejetim in lokalno ustvarjenim nosilnim signalom le znotraj ene valovne dolžine.

Figure 4: GNSS receiver measures a phase difference between received and receiver-generated carrier phase. The observable does not contain the initial integer ambiguity  $N(0)$ .

Za določitev položaja sprejemniki GNSS kombinirajo različne signale in hkrati obravnavajo tako opazovanja kode kot faze nosilnega signala. S primernim kombiniranjem opazovanj faze se tvorijo fazne razlike, s čimer se izničijo posamezne neznanke (na primer pogrešek urinega stanja) ali zmanjša sistematične vplive na opazovanja (na primer troposferska in ionosferska refrakcija, pogrešek tirnice satelita).

Linearna kombinacija opazovanj faze se zapiše kot

$$LC_r^s = a \cdot \Phi_{r,1}^s + b \cdot \Phi_{r,2}^s.$$

Obstaja več znanih linearnih kombinacij opazovanj. V primeru ionosfere proste linearne kombinacije sta parametra  $a = 2.545$  in  $b = -1.545$ , v primeru geometrije proste linearne kombinacije pa  $a = -1$  in  $b = 1$ . Poleg tega sta znana vsaj še tako imenovana širok pas (ang. Wide lane) in ozek pas (ang. Narrow lane). Različne kombinacije odlikujejo karakteristične valovne dolžine, občutljivost na vplive ionosfere, razmerje signal-šum ter narava fazne nedoločenosti.

S primernim kombiniranjem opazovanj faze na različnih nosilnih valovanjih se lahko odstrani vpliv ionsferske refrakcije. Tako na primer

$$\varphi_{L3} = \varphi_{L1} - \frac{f_1}{f_2} \varphi_{L2}$$

predstavlja ionosfere prosto linearno kombinacijo L3.

Če dva sprejemnika  $k$  in  $m$  hkrati sledita satelit  $p$ , se lahko tvori razlika opazovanj faze

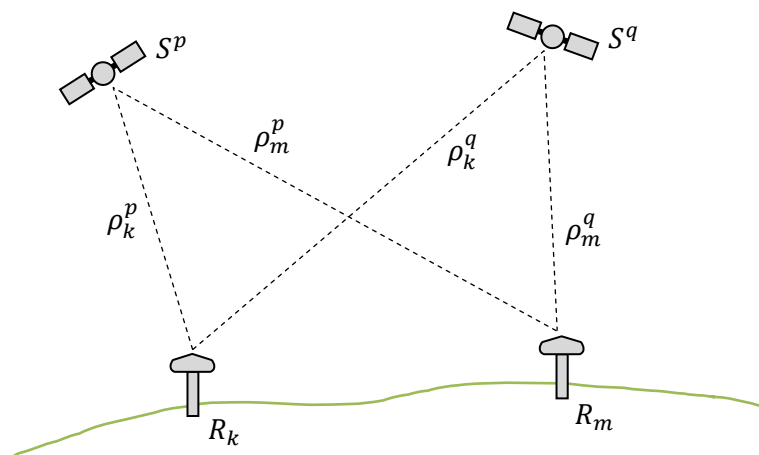
$$\Phi_{km}^p = \Phi_k^p - \Phi_m^p.$$

S tvorjenjem enojnih faznih razlik se izniči pogrešek urinega stanja satelitove ure. Učinkovito se zmanjša tudi vpliv atmosfarske refrakcije, saj je njen vpliv približno enak za oba sprejemnika. Enojne fazne razlike opazovanj kode se uporabljajo pri metodi DGNSS.

Če dva sprejemnika  $k$  in  $m$  hkrati sledita satelita  $p$  in  $q$ , se lahko tvori razlika dveh enojnih faznih razlik (slika 5)

$$\Phi_{km}^{pq} = \Phi_{km}^p - \Phi_{km}^q = (\Phi_k^p - \Phi_m^p) - (\Phi_k^q - \Phi_m^q) = \Phi_k^p - \Phi_m^p - \Phi_k^q + \Phi_m^q.$$

Prednost dvojnih faznih razlik je v odpravi vseh pogreškov z izvorom v satelitu (ob predpostavki, da so v satelitih vgrajene zelo stabilne atomske ure in je pogrešek urinega stanja satelitove ure enak v dveh skoraj enakih trenutkih oddaje signala različnim sprejemnikom), vseh pogreškov z izvorom v sprejemniku (ob predpostavki, da sta meritvi do obeh satelitov hkratni) in v učinkovitem zmanjšanju vplivov atmosfarske refrakcije (ob predpostavki, da sta sprejemnika dovolj blizu).



Slika 5: Dvojne fazne razlike se določi kot razlika opazovanj faze med dvema sprejemnikoma in dvema satelitoma.

Figure 5: The double difference is the difference between two pairs of single difference phase observables to two satellites at the same epoch.

Glede na zgornjo enačbo in z upoštevanjem zakona o prenosu pogreškov je razvidno, da so dvojne fazne razlike dvakrat manj natančne od samih opazovanj

$$\sigma_{DD} = \sqrt{\sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{\Phi}^2} = 2\sigma_{\Phi},$$

vendar pa so bolj točne, saj so v veliki meri odstranjeni pogreški z izvorom v satelitu, v sprejemniku in v atmosferi. Še vedno pa ostane neodstranjen vpliv večpotja, ki pa ga ni mogoče modelirati in je tudi neodvisen za vsak sprejemnik. Takšnim vplivom se je treba izogniti, na primer s pazljivo izbrano mikrolokacijo za namestitev antene GNSS, z uporabo anten s podnožnimi ploščami (ang. Ground Plane), na referenčnih postajah pa navadno z uporabo anten z dušilnimi obroči (ang. Choke-ring).

Tvorjenje dvojnih faznih razlik na posameznem valovanju (L1, L2) ima še eno dodatno prednost – neznanost števila celih valov se lahko določi kot celo število, oziroma zaradi preostalih pogreškov vsaj kot število zelo blizu celemu številu. To pa je ključnega pomena za natančno določitev koordinat sprejemnika. Brez faznih razlik se vrednosti  $N$  namreč ne da ločiti od ostalih vplivov na opazovanja in torej določiti kot celo število<sup>3</sup> (Blewitt, 1997).

V enačbi dvojnih faznih razlik ostanejo edine neznanke koordinate sprejemnika ter neznanost števila celih valov dvojnih faznih razlik

$$\Phi_{km}^{pq} = \rho_{km}^{pq} + N_{km}^{pq} \lambda.$$

Področje iskanja najverjetnejše celoštevilčne vrednosti  $N$  je že od zgodnjih poskusov ponujalo največ možnosti za razvoj algoritmov. V splošnem iskanje celoštevilčne vrednosti poteka z izločanjem napačnih možnosti. Da je število možnih najverjetnejših rešitev (kandidatov) dovolj majhno, je potreben dober začetni približek položaja sprejemnika. Za to se lahko uporabi kodna rešitev ali na primer trojne fazne razlike. Z nadštevilnimi opazovanji in več trenutki opazovanj se izloči najverjetnejši kandidat.

<sup>3</sup> Enačbo faznih opazovanj za sprejemnik  $A$  in satelit  $j$

$$\Phi_A^j(T_A) = f_0(T_A - T^j) + \varphi_{0A} - \varphi_0^j - N_A^j,$$

kjer sta  $\varphi_{0A}$  in  $\varphi_0^j$  začetni fazi, se prepíše v enačbo fazne psevdorazdalje tako, da se jo pomnoži z valovno dolžino

$$\Phi_A^j(T_A) = \lambda_0 \Phi_A^j(T_A) = \lambda_0 f_0(T_A - T^j) + \lambda_0(\varphi_{0A} - \varphi_0^j - N_A^j) = c(T_A - T^j) + \lambda_0(\varphi_{0A} - \varphi_0^j - N_A^j) = \rho_A^j + B_A^j.$$

Pri tem je prvi člen geometrična razdalja, člen  $B_A^j = \lambda_0(\varphi_{0A} - \varphi_0^j - N_A^j)$  pa je konstanta, vendar ni celo število, saj vsebuje tudi neznanost začetne vrednosti faze satelita in sprejemnika.

Če se tvorijo dvojne fazne razlike med sprejemnikoma  $A$  in  $B$  ter satelitoma  $j$  in  $k$

$$\Phi_{AB}^{jk} = \rho_{AB}^{jk} + B_{AB}^{jk},$$

se omenjena instrumentalna pogreška odstranita, zato je fazna nedoločnost pri dvojnih faznih razlikah na posameznem valovanju celo število

$$B_{AB}^{jk} = B_{AB}^j - B_{AB}^k$$

$$B_{AB}^{jk} = (B_A^j - B_B^j) - (B_A^k - B_B^k)$$

$$B_{AB}^{jk} = \lambda_0(\varphi_{0A} - \varphi_0^j - N_A^j) - \lambda_0(\varphi_{0B} - \varphi_0^j - N_B^j) - \lambda_0(\varphi_{0A} - \varphi_0^k - N_A^k) + \lambda_0(\varphi_{0B} - \varphi_0^k - N_B^k)$$

$$B_{AB}^{jk} = -\lambda_0(N_A^j - N_B^j - N_A^k + N_B^k) = -\lambda_0 N_{AB}^{jk}$$

$$\Phi_{AB}^{jk} = \rho_{AB}^{jk} - \lambda_0 N_{AB}^{jk}$$

Pri razvoju enačb zaradi enostavnosti niso bili upoštevani pogreški zaradi ionosfere, troposfere ter satelitove in sprejemnikove ure.

V različnih literaturah se za fazno nedoločnost uporabljata tako pozitiven kot negativen predznak, vendar s stališča določitve neznanega celega števila to ni pomembno (Blewitt, 1997).

S tvorjenjem trojnih faznih razlik se izniči tudi neznano število celih valov. Trojne fazne razlike se tvorijo kot razlika med dvema dvojnima faznima razlikama, sestavljenima v dveh različnih časovnih trenutkih

$$\Phi_{km}^{pq}(t_2, t_1) = \Phi_{km}^{pq}(t_2) - \Phi_{km}^{pq}(t_1).$$

Trojne fazne razlike se uporabljajo za prvi približek koordinat sprejemnika, ki se nato uporabi za natančen izračun komponent baznega vektorja v dvojnih faznih razlikah. S tvorjenjem trojnih faznih razlik se tudi odkrivajo prekinitve signala (ang. Cycle slips). Sama uporaba trojnih faznih razlik za geodetsko izmero pa sicer ni primerna zaradi občutnega zmanjšanja natančnosti, trojne fazne razlike pa vnašajo v opazovanja tudi koreliranost po času (Blewitt, 1997).

### 2.1.5 Referenčni satelit in referenčni sprejemnik

V splošnem v omrežju GNSS  $r$  sprejemnikov sledi  $s$  satelitov. Vseh možnih dvojnih faznih razlik, ki se jih lahko tvori, je

$$n_{DD} = \binom{s}{r} = \frac{s(s-1)(s-2)\dots(s-r+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot r}.$$

Vendar pa je samo  $(s-1)(r-1)$  dvojnih faznih razlik linearno neodvisnih. Vse ostale dvojne fazne razlike ne prinašajo nove informacije in se lahko tvorijo kot linearna kombinacija množice linearno neodvisnih faznih razlik.

Po drugi strani pa se lahko tvori več množic linearno neodvisnih dvojnih faznih razlik. Zato se izbere referenčni satelit, ki ga sledijo vsi sprejemniki. To je navadno satelit, ki je najdlje časa na obzorju in je brez prekinitvev, sodobni algoritmi pa izbirajo referenčni satelit za vsak časovni trenutek posebej. V omrežju GNSS se izbere tudi referenčni sprejemnik, ki je vsebovan v vseh dvojnih faznih razlikah. Tako se zadosti pogoju linearne neodvisnosti. Za referenčni sprejemnik se navadno izbere tisti v sredini omrežja, z najmanj ovirami in brez prekinitvev. Tudi pri izbiri referenčnega sprejemnika se sodobni algoritmi odločajo za vsak časovni trenutek posebej.

Če na primer referenčne postaje  $A$ ,  $B$  in  $C$  sledijo satelite 1, 2, 3 in 4 ter se za referenčno postajo izbere  $B$ , za referenčni satelit pa 3, potem je množica linearno neodvisnih dvojnih faznih razlik

$$\Lambda_B^3 = \{\Phi_{BA}^{31}, \Phi_{BA}^{32}, \Phi_{BA}^{34}, \Phi_{BC}^{31}, \Phi_{BC}^{32}, \Phi_{BC}^{34}\}.$$

V primeru, da vsi sprejemniki sledijo vse satelite v vseh časovnih trenutkih, se pridobi enak rezultat ne glede na izbiro referenčnega satelita in referenčnega sprejemnika ob predpostavki, da je matrika uteži pravilno konstruirana in da so odstranjeni vsi grobi pogreški. Dvojne fazne razlike, ki vsebujejo skupni, referenčni satelit in skupni, referenčni sprejemnik, so linearno neodvisne, vendar pa so statistično korelirane. Ker se ista enojna fazna razlika pojavlja v različnih enačbah (sicer linearno neodvisnih) dvojnih faznih razlik, se vsak pogrešek iz enojne fazne razlike prenese v več dvojnih faznih razlik. Zato je pomembno, da se v postopku določitve baznega vektorja vključi ustrezen stohastičen model, ki preko različnih uteži opisuje statistično naravo opazovanj (Blewitt, 1997).

### 2.1.6 Relativna določitev položaja iz opazovanj faze

Z obdelavo dvojnih faznih razlik med dvema sprejemnikoma se določi bazni vektor. Poenostavljeno se enačba dvojnih faznih razlik med sprejemnikoma  $k$  in  $m$  ter satelitoma  $p$  in  $q$  zapiše

$$\Phi_{km}^{pq} = \rho_{km}^{pq} + \lambda N_{km}^{pq}.$$

Če na primer dva sprejemnika  $A$  in  $B$  hkrati sledita 4 satelite in je za referenčni sprejemnik izbran satelit 2, ob predpostavki, da je položaj sprejemnika  $A$  znan in da je določitev komponent baznega vektorja  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  ekvivalentna določitvi položaja sprejemnika  $B$ , je potrebno oceniti naslednje neznanke  $\{x_B, y_B, z_B, N_{AB}^{21}, N_{AB}^{23}, N_{AB}^{24}\}$  po metodi najmanjših kvadratov. Če se neznanca števila celih valov dvojnih faznih razlik lahko določi kot cela števila, se nato dobi natančen položaj sprejemnika  $B$  iz istih opazovanj (Blewitt, 1997).

Člen  $\rho_{km}^{pq}$  je potrebno linearizirati skladno z enačbo

$$f(x_k, y_k, z_k) = f(x_{k0} + \Delta x_k, y_{k0} + \Delta y_k, z_{k0} + \Delta z_k),$$

tako da je

$$\begin{aligned} \rho_{km}^{pq} &= \rho_{k0}^p - \frac{x^p - x_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta x_k - \frac{y^p - y_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta y_k - \frac{z^p - z_{k0}}{\rho_{k0}^p} \cdot \Delta z_k - \\ &- \rho_{m0}^p + \frac{x^p - x_{m0}}{\rho_{m0}^p} \cdot \Delta x_m + \frac{y^p - y_{m0}}{\rho_{m0}^p} \cdot \Delta y_m + \frac{z^p - z_{m0}}{\rho_{m0}^p} \cdot \Delta z_m - \\ &- \rho_{k0}^q + \frac{x^q - x_{k0}}{\rho_{k0}^q} \cdot \Delta x_k + \frac{y^q - y_{k0}}{\rho_{k0}^q} \cdot \Delta y_k + \frac{z^q - z_{k0}}{\rho_{k0}^q} \cdot \Delta z_k + \\ &+ \rho_{m0}^q - \frac{x^q - x_{m0}}{\rho_{m0}^q} \cdot \Delta x_m - \frac{y^q - y_{m0}}{\rho_{m0}^q} \cdot \Delta y_m - \frac{z^q - z_{m0}}{\rho_{m0}^q} \cdot \Delta z_m \end{aligned}$$

Izraz se še poenostavi, če se upošteva, da so koordinate sprejemnika  $k$  znane ( $\Delta x_k = \Delta y_k = \Delta z_k = 0$ )

$$\begin{aligned} \rho_{km}^{pq} &= \rho_{k0}^p - \rho_{m0}^p - \rho_{k0}^q + \rho_{m0}^q + \\ &+ \left( \frac{x^p - x_{m0}}{\rho_{m0}^p} - \frac{x^q - x_{m0}}{\rho_{m0}^q} \right) \cdot \Delta x_m + \left( \frac{y^p - y_{m0}}{\rho_{m0}^p} - \frac{y^q - y_{m0}}{\rho_{m0}^q} \right) \cdot \Delta y_m + \left( \frac{z^p - z_{m0}}{\rho_{m0}^p} - \frac{z^q - z_{m0}}{\rho_{m0}^q} \right) \cdot \Delta z_m. \end{aligned}$$

Preprosto izračunljive člene v oklepajih se lahko nadomesti s simboli  $a_{m,x}^{pq}$ ,  $a_{m,y}^{pq}$  in  $a_{m,z}^{pq}$ , izraz za geometrično razdaljo dvojnih faznih razlik pa še poenostavi

$$\rho_{km}^{pq} = \rho_{k0}^p - \rho_{m0}^p - \rho_{k0}^q + \rho_{m0}^q + a_{m,x}^{pq} \cdot \Delta x_m + a_{m,y}^{pq} \cdot \Delta y_m + a_{m,z}^{pq} \cdot \Delta z_m.$$

Če se spet upošteva zveza

$$\widehat{\Phi}_{km}^{pq} = \Phi_{km}^{pq} + v_{km}^{pq},$$

se lahko zapiše

$$\Phi_{km}^{pq} + v_{km}^{pq} = \rho_{k0}^p - \rho_{m0}^p - \rho_{k0}^q + \rho_{m0}^q + a_{m,x}^{pq} \cdot \Delta x_m + a_{m,y}^{pq} \cdot \Delta y_m + a_{m,z}^{pq} \cdot \Delta z_m + \lambda N_{km}^{pq},$$

to pa se preoblikuje v enačbo popravkov

$$v_{km}^{pq} - a_{m,x}^{pq} \cdot \Delta x_m - a_{m,y}^{pq} \cdot \Delta y_m - a_{m,z}^{pq} \cdot \Delta z_m - \lambda N_{km}^{pq} = (\rho_{k0}^p - \rho_{m0}^p - \rho_{k0}^q + \rho_{m0}^q) - \Phi_{km}^{pq}.$$

Da se lahko določi položaj sprejemnika  $m$ , mora biti število enačb oziroma število opazovanj enako ali večje od števila neznank ( $d \geq p$ ). Ob predpostavki, da vsi sprejemniki sledijo iste satelite v vseh časovnih trenutkih, je število linearno neodvisnih dvojnih faznih razlik

$$d = q(r - 1)(s - 1),$$

kjer je  $q$  število časovnih trenutkov,  $r$  število sprejemnikov,  $s$  pa število satelitov.

Število neznank, ki jih je treba določiti, pa je

$$p = 3 + (r - 1)(s - 1),$$

torej tri koordinatne neznanke  $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$  ter za vsako opazovanje še po eno neznano število celih valov  $N_{km}^{pq}$ . Ker je število časovnih trenutkov lahko samo celo število, je pogoj izpolnjen le v primeru, da sta na voljo vsaj 2 časovna trenutka opazovanj, ne glede na število uporabljenih sprejemnikov in satelitov. Če se na primer predpostavi preprosta situacija dveh sprejemnikov ter opazovanja v dveh časovnih trenutkih, mora biti število opazovanih satelitov  $s \geq 4$  (Blewitt, 1997).

Če tako na primer sprejemnika  $k$  in  $m$  hkrati v dveh zaporednih časovnih trenutkih  $t_1$  in  $t_2$  sledita 4 satelite  $p, q, r$  in  $s$ , se lahko komponente enačbe popravkov zapišejo

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x_m \\ \Delta y_m \\ \Delta z_m \\ N_{km}^{pq}(1) \\ N_{km}^{pr}(1) \\ N_{km}^{ps}(1) \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} f_{km}^{pq}(t_1) \\ f_{km}^{pq}(t_1) \\ f_{km}^{pq}(t_1) \\ f_{km}^{pq}(t_2) \\ f_{km}^{pq}(t_2) \\ f_{km}^{pq}(t_2) \end{bmatrix}, B = - \begin{bmatrix} a_{m,x}^{pq}(t_1) & a_{m,y}^{pq}(t_1) & a_{m,z}^{pq}(t_1) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{m,x}^{pr}(t_1) & a_{m,y}^{pr}(t_1) & a_{m,z}^{pr}(t_1) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{m,x}^{ps}(t_1) & a_{m,y}^{ps}(t_1) & a_{m,z}^{ps}(t_1) & 0 & 0 & \lambda \\ a_{m,x}^{pq}(t_2) & a_{m,y}^{pq}(t_2) & a_{m,z}^{pq}(t_2) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{m,x}^{pr}(t_2) & a_{m,y}^{pr}(t_2) & a_{m,z}^{pr}(t_2) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{m,x}^{ps}(t_2) & a_{m,y}^{ps}(t_2) & a_{m,z}^{ps}(t_2) & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}.$$

Neznanke se nato določijo po metodi najmanjših kvadratov. Za neznanca števila celih valov se pridobi realno-številčna rešitev (ang. Float Solution).

### 2.1.7 Metoda LAMBDA

Določitev neznanega števila celih valov (ang. Ambiguity fixing, Ambiguity resolution) je:

- sredstvo za izboljšanje točnosti izmere GNSS,
- matematični proces pretvorbe sešteti faznih opazovanj v zanesljive razdalje z mm točnostjo,
- najpomembnejša faza visoko natančne izmere GNSS.

V klasični geodetski obdelavi opazovanj GNSS je določanje zanesljivega neznanega števila celih valov temeljilo na velikem številu opazovanj, v sodobni obdelavi pa predvsem na majhnem številu vseh možnih tipov opazovanj. Vedno pa je to ključna operacija, od katere je odvisna zanesljivost in točnost rezultatov izmere.



Na določitev teh neznank vplivajo:

- stopnja zanesljivosti ločevanja geodetskih neznank in neznanega števila celih valov,
- velikost nemodeliranih vplivov na opazovanja,
- dolžina baznega vektorja,
- geometrija satelit-sprejemnik in
- kakovost samih opazovanj.

Opazovanja faze nosilnega signala so osnova za najkakovostnejšo določitev položaja z izmero GNSS. Vendar so dvojne fazne razlike, ki so pogosto orodje za določitev relativnega položaja dveh sprejemnikov, nedoločene za neznan število celih valov. To a-priori informacijo se uporabi kot dodatno vez v postopku izravnave. Princip najmanjših kvadratov je pri tem uporabljen za iskanje najverjetnejšega celega števila valov. Ker za tako iskanje ne obstaja neposredna metoda, je treba opraviti diskretno iskanje. Kljub številnim naprednim iskalnim algoritmom se pojavijo težave pri vprašanju učinkovitosti teh metod – še posebno, kadar so na voljo le kratki intervali opazovanj, na primer zgolj nekaj trenutkov. Različne metode so predlagali Blewit, Euler in Landau, Frei, Hatch in Wübbena (Teunissen in sod., 1996).

V smeri iskanja optimalne metode ter optimizacije obstoječih so bile opravljene številne raziskave. Kot najboljša se je izkazala metoda z dekorelacijo neznanih števil celih valov po metodi najmanjših kvadratov (ang. Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment, LAMBDA), ki jo je leta 1993 predstavil Teunissen. Leta 1999 je tudi pokazal, da ima LAMBDA najvišjo stopnjo verjetnosti ocenitve pravih celoštevilčnih vrednosti neznanega števila valov med vsemi metodami (Joosten, Tiberius, 2002). LAMBDA predstavlja striktno implementacijo metode najmanjših kvadratov s celoštevilčnimi neznankami.

Metoda LAMBDA pa ni omejena samo na dvojne fazne razlike, ampak je uporabna tudi za enojne fazne razlike in nediferencirana opazovanja. Metoda je uporabna prav v vseh primerih, kjer je treba oceniti celoštevilčne neznanke, če je le predhodno mogoče pridobiti realne ocene le-teh, torej tudi za druge sisteme GNSS – GLONASS, Galileo in prihodnje signale, na primer GPS L5 (Joosten, Tiberius, 2002).

Določitev neznanega števila celih valov dvojnih faznih razlik (oziroma rešitev poljubnega problema s celoštevilčnimi neznankami) sestoji iz treh korakov, ki so prikazani na sliki 6:

- V prvem koraku celoštevilčna narava neznanega števila celih valov ni upoštevana. Neznano število celih valov in ostale neznanke (komponente baznega vektorja, lahko pa tudi druge, na primer troposferska refrakcija) se določijo s klasično izravnavo po metodi najmanjših kvadratov ali s Kalmanovim filtrom. Na ta način se pridobi realnoštevilčna rešitev.

- V drugem koraku se oceni neznano število valov kot celo število z rešitvijo  $\min_a (\hat{a} - a) Q_a^{-1} (\hat{a} - a)$ ;  $a \in \mathbb{Z}$ ,

- V zadnjem koraku se izračunane celoštevilčne vrednosti  $\hat{a}$  uporabijo za izboljšanje rešitve iz prvega koraka

$$\hat{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_a^{-1} (\hat{a} - \hat{a}) \text{ in}$$

$$Q_{\hat{b}} = Q_{\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_a^{-1} Q_{\hat{a}\hat{b}},$$

pri čemer vrednosti neznanih števil celih valov, ki sedaj nastopajo v enačbah kot dane vrednosti, izboljšajo rešitev za ostale neznanke. Rezultat je fazno določena rešitev, ki je v splošnem mnogo bolj natančna od realnoštevilčne ( $Q_{\hat{b}} \ll Q_{\hat{b}}$ ).

Pri tem so

$y$  vektor opazovanj faze nosilnega signala in dodatno lahko tudi opazovanja psevdo-razdalj na osnovi kode,

$Q_y$  variančno-kovariančna matrika opazovanj,

$a$  vektor celoštevilčnih neznank (neznana števila celih valov),

$b$  vektor neznanih komponent baznega vektorja, atmosferskih zakasnitev in morebitnih drugih neznank, ki se ocenjujejo v postopku izravnave,

$A, B$  ustrezni matriki koeficientov,

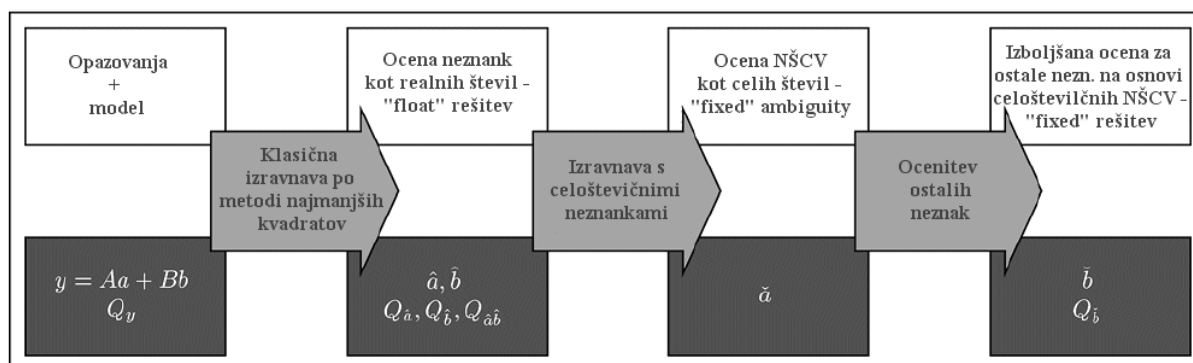
$\hat{a}, \hat{b}$  realnoštevilčni oceni neznank,

$Q_{\hat{a}}, Q_{\hat{b}}$  ustrezni variančno-kovariančni matriki,

$Q_{\hat{a}\hat{b}}$  kovarianca med realnoštevilčnimi ocenami,

$\check{a}$  celoštevilčna ocena neznanega števila celih valov ter

$\check{b}, Q_{\check{b}}$  končna rešitev in pripadajoča ocena natančnosti (Joosten, Tiberius, 2002).



Slika 6: Postopek reševanja problema po metodi najmanjših kvadratov v primeru, da so nekatere neznanke cela števila.

Figure 6: Procedure to solve a least-square adjustment problem in which some of the parameters are known to be integer.

Da je mogoče iz realnoštevilčne rešitve izločiti celoštevilčno (z  $n$  vrednostmi neznanih števil celih valov) je potrebna transformacija  $n$ -dimenzionalnega prostora  $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{Z}^n$ . Kot optimalni kriterij nastopa metoda najmanjših kvadratov. Rešitev je optimalna v smislu največje verjetnosti, da so ocenjene celoštevilčne neznanke res prave. Če bi bila variančno-kovariančna matrika neznanih števil celih valov  $Q_{\hat{a}}$  diagonalna, bi bila realno-številčna neznana števila celih valov nekorelirana in bi bilo mogoče pridobiti celoštevilčne vrednosti z enostavno zaokrožitvijo. V splošnem temu ni tako, zato je potrebno neznanke za neznana števila celih valov najprej de Korelirati (pridobiti matriko kofaktorjev celih števil za neznane začetne vrednosti celih valov, ki bo diagonalna matrika), najverjetnejše celoštevilčne vrednosti pa se nato določi z diskretnim iskanjem v podprostoru  $\mathbb{Z}^n$  (Teunissen in sod., 1996). Postopek je podrobno opisal de Jonge (1996).

### 2.1.8 Kalmanov filter

Kalmanov filter je optimalni rekurzivni linearni algoritem za obdelavo opazovanj. Za pridobitev ocene stanja sistema ali iskanih količin algoritem obdelava vsako opazovanje ne glede na njegovo natančnost. Pri tem vključuje vsa razpoložljiva znanja o dinamiki sistema in uporabljenih merskih napravah, statističnih lastnosti merskih pogreškov, pogreškov sistema in dinamiki modela ter začetnih vrednostih iskanih količin. V Kalmanovem filtru se poleg koordinat in pogreška urinega stanja sprejemnikove ure lahko ocenjujejo tudi druge neznanke. V splošnem velja, da se lahko vsaka neznanca oceni kot del matematičnega modela, ali pa se njen vpliv odstrani s primernim stohastičnim modelom.

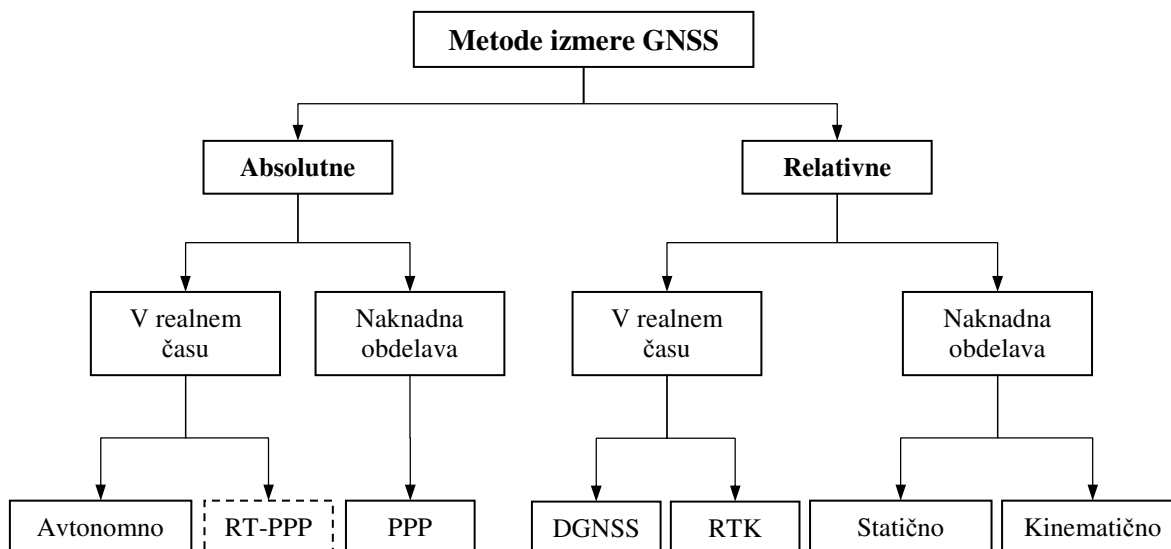
Kalmanov filter se izvaja rekurzivno, v dveh korakih – napovedi naslednjega stanja sistema ter posodobitvijo ocene stanja z novim vektorjem opazovanj. Naslednje stanje sistema se določi na osnovi znanja o dinamiki sistema, ki je zajeta v matriki prehajanja stanj. V drugem koraku pa filter na osnovi kovariančnih matrik vektorja stanja in vektorja meritev posodobi a-priori oceno vektorja stanj z novo meritvijo. To novo (a-posteriori) oceno vektorja stanj pa se nato ponovno projicira naprej v času. O Kalmanovem filtru obširno pišeta Welch in Bishop (2006).

Ena pomembnih lastnosti Kalmanovega filtra je tudi ta, da so v model lahko vključena opazovanja, pridobljena z različno mersko opremo. Zato se pogosto uporablja v nalogah navigacije, še posebej v primerih kombinacije GNSS in inercialnih sistemov (na primer žiroskopi, odometri, pospeškometri), njegovo uporabnost v kinematičnih aplikacijah v terestrični geodeziji pa opisujeta tudi Bogatin in Kogoj (2006).

### 2.1.9 Metode izmere GNSS

Za večino primerov uporabe tehnologije GNSS zadoščajo absolutne metode določitve položaja s točnostjo od nekaj metrov do nekaj deset metrov. Za določitev položaja z višjo točnostjo pa se uporabljajo relativne metode določitve položaja z uporabo različnih vrst opazovanj, pri čemer je en sprejemnik referenčni, z drugim pa se določajo položaji novih točk. Sprejemnik, katerega položaj se določa, lahko med opazovanji miruje – statična določitev položaja, ali se premika – kinematična določitev položaja. Položaj sprejemnika se lahko določi v času izvajanja meritev – določitev položaja v realnem času (ang. Real-Time), ali po zaključku meritev – določitev položaja z naknadno obdelavo opazovanj (ang. Post-processing).

V zadnjem času najbolj razširjena metoda RTK-GNSS (Real-Time Kinematic GNSS) omogoča določitev položaja premikajočega se sprejemnika v realnem času s točnostjo 10 mm + 1 ppm (Leica Geosystems, 2008). Metoda izmere RTK-GNSS se od prav tako relativne metode DGNS (Differential GNSS) loči po tem, da DGNS temelji na obdelavi opazovanj kode in je zato primerna za izmere manjše točnosti (< 1 m).



Slika 7: Različne metode izmere GNSS.

Figure 7: GNSS surveying methods.

Relativne metode določitve položaja GNSS s centimetrsko točnostjo v realnem času, ki temeljijo na obdelavi opazovanj faze nosilnega signala, so bile razvite v sredini 90. let prejšnjega stoletja.

Vključujejo referenčni sprejemnik, ki svoja opazovanja faze nosilnega signala ali popravke opazovanj pošilja premičnemu sprejemniku po enem od komunikacijskih kanalov. Postopek skupne obdelave opazovanj referenčnega in premičnega sprejemnika vključuje določitev neznanega števila celih valov signala od satelita do sprejemnika ter ocenitev baznega vektorja med sprejemnikoma.

Postopoma se uveljavljajo tudi natančne absolutne metode izmere GNSS – PPP (Precise Point Positioning). Metoda temelji na obdelavi opazovanj faze enega samega sprejemnika. Z obdelavo opazovanj faze obeh nosilnih valovanj se odstrani vpliv ionosfere, uporabljajo pa se tudi zelo točne ocene stanja satelitovih ur in precizne efemeride, ki so pridobljene na osnovi podatkov globalne mreže postaj GNSS. To pa je tudi glavna slabost metode, saj je na te podatke navadno treba čakati 2 tedna. Metoda izmere PPP-GNSS omogoča pridobitev koordinat s točnostjo od 1 cm do 1 dm, vendar pa ni primerna za določitev koordinat točk v mreži, saj je vsaka točka določena neodvisno od drugih (Lachapelle, Petovello, 2006).

Določitev položaja z metodo izmere PPP-GNSS pogosto temelji na obdelavi ionosfere-proste kombinacije opazovanj kode in faze:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot P_{L1} - f_2^2 \cdot P_{L2}}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdT + d_{trop},$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot \Phi_{L1} - f_2^2 \cdot \Phi_{L2}}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdT + d_{trop} + \frac{cf_1 N'_1 - cf_2 N'_2}{f_1^2 - f_2^2},$$

kjer so

$P_{Li}$ ,  $\Phi_{Li}$  opazovanji kode in faze na nosilnem valovanju  $i$ ,

$f_1$ ,  $f_2$  frekvenci nosilnih valovanj GPS L1 in L2,

$\rho$  prava geometrična razdalja,

$c$  hitrost svetlobe,

$dT$  pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure,

$d_{trop}$  vpliv troposferske refrakcije in

$N_i'$  neznanost števila valov.

Neznanke, ki jih je treba določiti, vključujejo koordinate sprejemnika, neznanost števila valov, pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure in vpliv troposfere. Pomembno je opozoriti, da  $N_i'$  ni celo število, saj vsebuje tudi začetni vrednosti faze satelita in sprejemnika

$$N_i' = N_i + \varphi_i^r(t_0) - \varphi_i^s(t_0).$$

Ta dva odmika se sicer pri relativnih metodah izmere izničita v postopku faznih razlik, pri natančni absolutni metodi izmere pa je to velik izziv za raziskovalce (Lachapelle, Petovello, 2006).

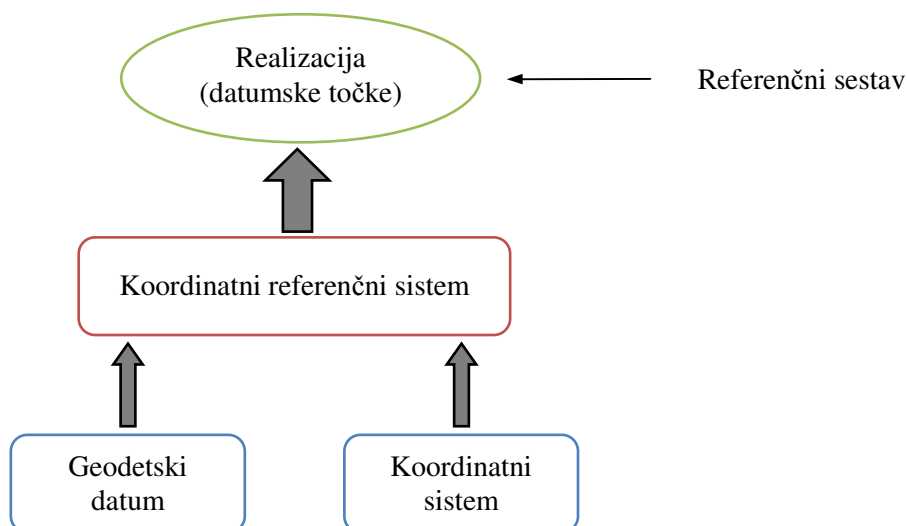
Različne metode izmer GNSS so prikazane na sliki 7.

### 2.1.10 Koordinatni sistemi in koordinatni sestavi

Sodobna definicija geodezije le-to opredeljuje kot vedo, ki se ukvarja z merjenjem in predstavitvijo Zemlje ter njenega gravitacijskega in magnetnega polja. Rešitev te naloge je mogoča le v okviru ustreznih koordinatnih sistemov. Za potrebe nalog geodezije je zato treba določiti povezave med fizikalnimi lastnostmi prostora (kot na primer težnostno polje, atmosfera, geodinamika) in časovno stabilnim prostorom znanih geometrijskih lastnosti, na katerega se morajo nanašati položaji točk.

Koordinatni sistem predstavlja dogovor o parametrih, ki definirajo koordinatni sistem: razsežnost koordinatnega sistema, koordinatno izhodišče, tip koordinat, orientacija koordinatnih osi in merilo. To je množica pravil, ki določajo način dodeljevanja koordinat točkam v prostoru.

Naloga koordinatnega sestava pa je materializacija koordinatnega sistema. Šele materializiran koordinatni sistem je uporaben za opis položajev točk ter njihovih sprememb. Trirazsežni koordinatni sistem na državnem ozemlju (praktično) predstavljajo (državne) geodetske mreže. Povezavo med koordinatnim sistemom in koordinatnim sestavom zagotavljajo opazovanja (Stopar, Kuhar, 2001). Geodetski datum je množica parametrov, ki določajo odnos koordinatnega sistema do telesa Zemlje. Geodetski datum predstavljajo dane količine, potrebne za določitev novih količin v izbranem koordinatnem sistemu. Zagotoviti ga morajo vnaprej dane (zunanje) količine. Opazovanja (notranje količine) ne omogočajo pridobitve koordinat točk v koordinatnem sistemu. Geodetska opazovanja (dolžine, horizontalne smeri, zenitne razdalje ...) so notranja opazovanja oziroma notranje količine. Koordinate točk v (predhodno definiranem) koordinatnem sistemu pa so zunanja opazovanja oziroma zunanje količine (Stopar, 2010). Povezavo koordinatnega sistema in koordinatnega sestava prikazuje slika 8.



Slika 8: Koordinatni referenčni sistem je koordinatni sistem, ki je preko geodetskega datuma povezan s telesom Zemlje (Mozetič, 2006).

Figure 8: Reference system is earth-fixed coordinate system (Mozetič, 2006).

Globalni, geocentrični, absolutni, terestrični koordinatni sistemi so vzpostavljeni na osnovi opazovanj geodetske astronomije, satelitske geodezije in absolutne gravimetrije. Lokalni, kvazigeocentrični, relativni, astrogeodetski koordinatni sistemi so vzpostavljeni na osnovi opazovanj klasične, terestrične geodezije (Stopar, 2010).

V geodeziji in astronomiji sta potrebna samo dva tipa koordinatnih sistemov. Prvi je Dogovorjeni inercialni sistem (ang. Conventional Inertial System, CIS), ki je na dogovorjeni način pritrjen na oddaljene izvore radijskih valovanj, kvazarje. CIS služi kot osnova za obravnavo gibanja drugega sistema Dogovorjenega terestričnega sistema (ang. Conventional Terrestrial System, CTS). CTS se premika skupaj z Zemljo in je na dogovorjeni način pritrjen na določeno število observatorijev na Zemlji. Omenjena osnovna sistema je definirala služba International Earth Rotation Service (IERS) pod imeni Mednarodni nebesni referenčni sistem (ang. International Celestial Reference System, ICRS) ter Mednarodni terestrični referenčni sistem (ang. International Terrestrial Reference System, ITRS).

Izhodišče ICRS je v težišču Sončevega sistema, osi koordinatnega sistema so pritrjene glede na oddaljene kvazarje z natančnostjo, višjo od 0.02 tisočinke kotne sekunde. ICRS je materializiran s položaji 608 kvazarjev, ocenjenimi na osnovi opazovanj med leti 1979 in 1995 in ga imenujemo Mednarodni nebesni referenčni sestav (ang. International Celestial Reference Frame, ICRF) (Stopar, Kuhar, 2001).

### 2.1.11 Z GNSS povezani koordinatni sistemi in koordinatni sestavi

WGS-84 (World Geodetic System, realizacija 1984) je globalni koordinatni sistem z izhodiščem v težišču Zemlje, ki se vrti skupaj z njo. Položaj točke v tem sistemu je določen s kartezičnimi  $(X, Y, Z)$  ali z geografskimi koordinatami  $(\varphi, \lambda, h)$ . Višina v tem sistemu je določena kot pravokotna oddaljenost točke nad elipsoidom WGS-84, ki aproksimira Zemljo kot telo. Koordinatni sistem WGS-84 je definiralo ameriško Ministrstvo za obrambo za potrebe globalne določitve položaja, navigacije in kartiranja. Ta sistem se uporablja pri absolutni določitvi položaja z GPS, saj so v njem podane tudi

oddane efemeride, torej položaji satelitov. Za potrebe izmere na posameznem območju ali državi pa takšen globalni sistem ni primeren. Problem je, da se kontinenti neprestano premikajo zaradi tektonike in plimovanja litosferskih plošč drug na drugega s hitrostmi do 12 cm/leto. Zaradi tega se koordinate točke v sistemu WGS-84 neprestano spreminjajo, zato globalni koordinatni sistemi niso primerni za natančno geodetsko izmero (Ordnance Survey).

Povezava sistema GPS s koordinatnim sistemom ITRS je postala aktualna z ustanovitvijo službe IGS (International GNSS Service), ki sodeluje s službo IERS. IERS je odgovorna za določanje ITRF-koordinat točk in parametrov rotacije Zemlje v času.

Globalni terestrični referenčni sistem ITRS je sestavljen na osnovi predpisov, dogovorov in modelov o izhodišču, merilu, orientaciji in časovnih relacijah z Dogovorjenim terestričnim referenčnim sistemom CTRS (Conventional Terrestrial Reference System). Izhodišče ITRS je v težišču telesa Zemlje, ki vključuje oceane in Zemljino atmosfero.

ITRS je materializiran z ocenjenimi položaji in hitrostmi sprememb položajev izbranih IERS geodetskih observatorijev, ki se imenujejo Mednarodni terestrični referenčni sestav (ang. International Terrestrial Reference Frame, ITRF). Osnova so opazovanja postaj VLBI (ang. Very Long Baseline Interferometry), GNSS, SLR (ang. Satellite Laser Ranging) in DORIS (ang. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite).

Množica točk, ki definirajo ITRF, se povečuje, tako da se pojavljajo nove različice ITRF. Le-te izhajajo v obliki ITRF<sub>yy</sub>, kjer je s končnico »yy« podano leto izdaje različice sestava ITRF (Stopar, Kuhar, 2001).

Aktualna realizacija ITRS je ITRF2008. ITRF je 4-razsežen koordinatni sestav, saj se koordinate točk v tem sestavu zaradi tektonskih premikov spreminjajo do 10 cm/leto. ITRF je definiran s koordinatami točk v referenčnem časovnem trenutku in vrednostmi hitrosti sprememb koordinat točk. Točnost ITRF2008 je 2-3 mm, z WGS-84 pa sovпада na približno 10 cm (Stopar, 2010).

Analizni center IGS uporablja koordinate ITRF referenčnih točk GPS za namen določanja preciznih efemerid. Izračunane natančne koordinate satelitov so zato določene v koordinatnih sestavih ITRF.

Na zasedanju generalne skupščine v Vancouvru leta 1987 je IAG (International Association of Geodesy) ustanovila podkomisijo EUREF (EUropean REference Frame) Komisije X Kontinentalne mreže (ang. IAG Commission X on Continental Networks). Glavni namen ustanovitve EUREF je bila vzpostavitev najnatančnejše trirazsežne geodetske mreže, ki bo predstavljala osnovo za praktično realizacijo novega terestričnega koordinatnega sistema za območje Evrope, ob celoviti izrabi možnosti, ki jih ponujajo tehnike satelitske geodezije. Izvedba te naloge je bila mogoča ob predhodno definiranim in dostopnem koordinatnem sistemu ITRS. Ker koordinatni sistem za območje Evrope definirajo točke na evrazijski litosferski plošči, se položaji teh točk spreminjajo skupaj in enakomerno. Ta regionalni koordinatni sistem, ki ga je sprejel EUREF, se imenuje ETRS89 (ang. European Terrestrial Reference System 89). S koordinatnim sistemom ITRS je sovpadal ob začetku leta 1989 (trenutek 1989.0). Pritrjen je na stabilni del evrazijske litosferske plošče. Evropski terestrični referenčni sistem ETRS89 je primer regionalne zgojitve globalnih terestričnih referenčnih sestavov, zato se uvršča med regionalne koordinatne sisteme (Stopar, Kuhar, 2001).

ETRS89 podpira Evropska unija in je referenca za vse geografske informacije na ozemlju Evrope. Realizacije sistema ETRS89 so referenčni sestavi ETRFyy. V današnjem času do ETRS89 dostopamo preko omrežja EPN (EUREF Permanent Network). EPN je definiran kot omrežje stalno delujočih referenčnih postaj GNSS, ki deluje ob ustrezni znanstveni podpori. Postaje v EPN imajo znane natančne koordinate v ETRS89. 9. novembra 2013 je bilo v omrežje EPN vključenih 248 stalnih referenčnih postaj GNSS (EPN Central Bureau, 2013).

Na območju Slovenije je bil leta 1994 v okviru izmere EUREF CRO-SLO '94 določen položaj 8 točk v koordinatnem sistemu ETRS89. V drugi izmeri leta 1995 z imenom SLOVENIJA '95 je bila mreža EUREF zgoščena. Izmera je bila opravljena na vseh 34 točkah astrogeodetske mreže, na nekaj drugih geodetskih točkah ter na še 12 na novo vzpostavljenih geodinamičnih točkah. Končni rezultat te izmere so položaji točk v ITRF93 (1995.7) in ETRS89 (1989.0).

### 2.1.12 Prenos podatkov GNSS v realnem času

Pri metodah izmere DGNSS in RTK se zahteva prenos podatkov (opazovanj kode in/ali faze nosilnega signala, oziroma popravkov teh opazovanj) z ene ali več referenčnih postaj do premičnega sprejemnika preko brezžičnih komunikacijskih povezav. Večina proizvajalcev merske opreme GNSS je razvila lastne (ang. Proprietary) podatkovne zapise, na primer Leica LB2, Trimble RT17 in RT27, Ashtech MBEN in PBEN ali Topcon TPS. Čeprav takšni lastni podatkovni zapisi zagotavljajo robusten in zanesljiv način prenosa podatkov, običajno pa omogočajo pošiljanje tudi dodatnih podatkov premičnemu sprejemniku, na primer stanje baterije in pomnilnika referenčnega sprejemnika, pa so primerni zgolj za prenos podatkov med sprejemniki istega proizvajalca. Z razvojem stalnih referenčnih postaj in omrežij GNSS pa se je izrazito pojavila potreba po medopravilnosti (ang. Interoperability), saj takšna omrežja navadno sestavlja oprema različnih proizvajalcev in različnih tipov.

Za realno-časovni prenos podatkov so potrebni:

- protokol za prenos podatkov (ang. Transmission Protocol),
- podatkovni zapis (ang. Data Format) in
- komunikacijska povezava (ang. Communication Link).

Protokol zagotavlja kontrolni mehanizem za zanesljivo prenašanje podatkov po komunikacijskem kanalu. Zapis podatkov predstavlja dogovor, kako pretvoriti zaporedje bitov v pomenljivo informacijo. Komunikacijska povezava pa predstavlja način prenosa informacije od ene naprave do druge (Heo in sod., 2009).

Za prenos surovih opazovanj med referenčnimi postajami in programsko opremo za upravljanje postaj se najpogosteje uporabljajo širokopasovne povezave, ki temeljijo na protokolu TCP/IP. Za prenos podatkov med referenčnim in premičnim sprejemnikom preko interneta pa se je uveljavil protokol NTRIP, ki je posebej prilagojen za posredovanje podatkov GNSS. Ta protokol je organizacija Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) potrdila kot standard za paketni prenos podatkov. NTRIP uporablja protokol TCP/IP za zanesljivo dostavo podatkovnih paketov. Če protokol TCP/IP omogoča samo povezavo med dvema napravama – strežnikom in (enim) odjemalcem, pa NTRIP omogoča posredovanje podatkov poljubnemu številu odjemalcev (ang. NTRIP Client) preko enih samih IP vrat, kar je s stališča IT velika prednost. NTRIP Caster ima vlogo strežnika HTTP (ang. Hypertext Transfer Protocol), ki sprejema podatkovne tokove z enega ali več strežnikov (ang. NTRIP



Server) ter jih posreduje odjemalcem NTRIP. Strežniki NTRIP imajo prav tako kot odjemalci NTRIP v tem primeru vlogo odjemalcev HTTP.

Vrsto let so se za potrebe DGNSS in RTK uporabljale komunikacijske povezave VHF in UHF. Z razvojem globalnih mobilnih komunikacijskih sistemov (GSM) ter še posebno z njihovo nadgradnjo za paketni prenos podatkov (GPRS, UMTS) pa je predvsem na področju geodetske izmere praktično prevladal slednji način komunikacije (Heo in sod., 2009).

RTCM je neprofitna mednarodna znanstvena, profesionalna in izobraževalna organizacija. Njeni člani so tako vladne kot nevladne organizacije – proizvajalci radio-navigacijskih in radio-komunikacijskih sistemov, vladne službe, zadolžene za standardizacijo pomorskih radio-navigacijskih in radio-komunikacijskih sistemov, lastniki in upravitelji plovil, izobraževalne ustanove ter ponudniki opreme in storitev. Čeprav je bila ustanovljena leta 1947 kot svetovalni odbor ameriške vlade, je RTCM danes neodvisna mednarodna organizacija. Posebni odbori RTCM (ang. RTCM Special Committees) omogočajo članom, da s skupnim delom razvijajo tehnične standarde in oblikujejo priporočila za posamezna področja znotraj RTCM (RTCM).

Pod okriljem organizacije RTCM je bil že leta 1983 ustanovljen odbor SC-104 za razvoj standardov za podporo DGPS v navigaciji in določanju položaja. Standardi, ki so bili razviti pod okriljem RTCM SC-104, predpisujejo zapis podatkov – vrste sporočil in njihovo vsebino: glavo sporočila, vsebino sporočila ter načine za ugotavljanje in odpravljanje napak.

Prvo različico je nadomestila različica 2, ko so se pokazale težave z implementacijo. V različici 2.1 (1994) so bila dodana sporočila za podporo izmeri RTK, v 2.2 (1998) pa še sporočila za podporo GLONASS. Aktualna različica 2.3 (2001) vključuje številna nova sporočila za izboljšano podporo izmeri RTK (višjo ločljivost podajanja koordinat referenčne postaje, tip uporabljene referenčne antene).

Različica 3 standarda za podporo realno-časovnim metodam izmere GNSS je bila prvotno zastavljena kot izboljšava standarda RTCM 2.3 v smeri večje učinkovitosti (manjše potrebne pasovne širine), višje integritete, razširljivosti in pripravljenosti na prihajajoče in modernizirane GNSS (GPS L5, GPS L2C, Galileo ...) ter enostavnejše implementacije zaradi skladnosti s sodobnimi komunikacijskimi standardi. Različica 3.1 pa razširja njegovo uporabnost še na področje omrežij GNSS z neposredno implementacijo koncepta MAC (Wübbena in sod., 2006).

### **2.1.13 RTCM 3.x**

Standardi različice RTCM 2.x temeljijo na strukturi navigacijskih sporočil GPS (dolžina in oblika stavkov, postopki za izračun paritete ...). Z leti razvoja so se pojavile številne omejitve, še posebej neekonomičnost samega zapisa podatkov, nezmožnosti razširitve za podporo omrežjem in prihodnjim GNSS, izginila pa je tudi prednost strukture, ki ni zahtevala vgradnje dodatnih algoritmov za dekodiranje RTCM sporočil v sprejemnikovi sistemski programski opremi.

Nov zapis podatkov RTCM 3.x odpravlja vse omenjene težave. Njegova izpopolnjena struktura omogoča učinkovitejšo izrabo pasovne širine ter zanesljivo ugotavljanje in odpravljanje napak pri prenosu. Že od vsega začetka je zasnovan tako, da ga je preprosto nadgraditi in razširiti z novimi sporočili.

Nova struktura zapisa podatkov se začne s prvimi 8 biti začetnega zaporedja in 6 rezerviranimi biti. Dolžina vsakega sporočila je spremenljiva (0-1023 bajtov) in je odvisna od tipa sporočila. Za kontrolo parnosti je na koncu vsakega sporočila namenjenih 24 bitov. Uporabljen je prilagojen Qualcommov algoritem CRC-24Q (ang. Cyclic Redundancy Check). Ta algoritem je učinkovitejši od algoritma, uporabljenega v RTCM 2.x, saj porabi le 24 bitov na sporočilo (RTCM 2.x porabi 6 bitov za vsako 30-bitno besedo) in omogoča, da je vsako sporočilo neodvisno od drugih (pri RTCM 2.x se za izračun parnosti uporabljajo tudi biti predhodne besede). Algoritem zagotavlja tudi izboljšano integriteto, saj je verjetnost neugotovljene napake manjša od  $2^{-24} = 5.96 \times 10^{-8}$ , pri verjetnosti pojavitve napake na posameznem bitu  $< 0.5$  (Heo in sod., 2009).

Preglednica 1: Struktura sporočila RTCM 3.x (RTCM 10403.1:2009).

Table 1: RTCM 3.x message structure (RTCM 10403.1:2009).

Začetni niz	Rezervirano	Dolžina sporočila	Vsebina sporočila (podatki)	CRC
8 bitov	6 bitov	10 bitov	Različna dolžina, celo število bajtov	24 bitov
11010011	000000		0-1023 bajtov	

RTCM 3.x je fleksibilen zapis podatkov. Tipi sporočil (ang. Message Type) so združeni v skupine. Različni tipi sporočil znotraj skupine vsebujejo podobne informacije. Tipi sporočil se lahko med seboj kombinirajo, kar na primer pomeni, da lahko ponudnik storitev DGNSS/RTK izbere iz skupine GPS-opazovanj tip sporočila 1001 za podporo uporabnikom enofrekvenčnih (L1) sprejemnikov, za zagotovitev najmanjše potrebne pasovne širine; ali pa izbere tip 1004 za podporo uporabnikom dvofrekvenčnih sprejemnikov (L1 in L2).

RTCM 3.x določa bistveno večje število različnih tipov sporočil v prid večji preglednosti in nedvoumnosti. Če v primeru RTCM 2.x sporočilo tipa 18 lahko vsebuje opazovanje faze nosilnega valovanja GPS L1, GPS L2, GLONASS L1 ali GLONASS L2, kar je razvidno šele po dekodiranju dveh dodatnih indikatorjev v sporočilu, pa RTCM 3.x določa kar 8 različnih tipov sporočila za prenos podatkov o opazovanjih GPS in GLONASS.

Za optimizacijo potrebne pasovne širine se pri oblikovanju sporočil RTCM 3.x uporabljajo različni pristopi. V sporočilih se ne prenašajo velike vrednosti. Tako se na primer v sporočilih tipov 1001 do 1008 ne pošilja podatek o celotni psevdo-razdalji L1, ampak le njena vrednost modulo 1 ms (za GLONASS modulo 2 ms), tako da je obseg vrednosti zmanjšan na 0-299792.46 m. Psevdo-razdalja L2 ter fazni razdalji L1 in L2 pa se prenašajo samo kot razlike glede na psevdo-razdaljo L1:

- L1 psevdo-razdalja modulo 1 ms (2 ms za GLONASS) ali celotna L1 psevdo-razdalja,
- L2 psevdo-razdalja – L1 psevdo-razdalja ( $\pm 163.820$  m),
- L1 fazna razdalja – L1 psevdo-razdalja ( $\pm 262.143$  m),
- L2 fazna razdalja – L1 psevdo-razdalja ( $\pm 262.143$  m).

Z namenom dodatnega zmanjševanja potrebnega števila podatkovnih bitov za prenos informacije so določena sporočila tudi združena glede na RTCM 2.x. Tako na primer sporočilo tipa 1003 vsebuje enako informacijo kot sporočili RTCM 2.x 18 in 19 (opazovanja faze nosilnega valovanja in kodna psevdo-razdalja), ob bistvenem prihranku pasovne širine (Lin, 2006).

RTCM 3.x nadalje razdeli popravke opazovanj na nosilnih frekvencah L1 in L2 na disperzne (ang. Ionospheric Carrier Phase Correction Difference, ICPCD) in nedisperzne (ang. Geometric Carrier Phase Correction Difference, GCPCD), ki se jih lahko pošilja ločeno in z različnimi časovnimi

intervali ter tako še dodatno zmanjša potrebno pasovno širino do 80% glede na RTCM 2.x (Heo in sod., 2009).

Zaradi omenjenega je zapis podatkov RTCM 3.x do 70% bolj učinkovit – za prenos iste informacije v povprečju potrebuje le 30% pasovne širine, ki je potrebna v primeru RTCM 2.x.

Za potrebe pošiljanja mrežnih popravkov pa standard RTCM 3.x uvaja še nekatere druge pojme: skupni nivo fazne nedoločenosti; podomrežje (ang. Subnetwork), ki je ekvivalentno s pojmom grozd in celica, znotraj katerega imajo vse postaje isti nivo fazne nedoločenosti; glavna in pomožna referenčna postaja (ang. Master/Auxiliary) ter ionosferski (dispersni) in geometrični (nedispersni) popravki (ang. Dispersive/Non-dispersive Corrections). Ti pojmi so podrobneje predstavljeni v poglavju *Koncept Master-Auxiliary*.

Preglednica 2: Prve štiri skupine sporočil RTCM 3.

Table 2: First four groups of RTCM 3 message types.

Skupina	Tip	Vsebina
Opazovanja	1001	Opazovanja GPS L1
	1002	Razširjena opazovanja GPS L1 (razmerje signal/šum, CNR)
	1003	Opazovanja GPS L1 in L2
	1004	Razširjena opazovanja GPS L1 in L2 (razmerje signal/šum, CNR)
	1009	Opazovanja GLONASS L1
	1010	Razširjena opazovanja GLONASS L1 (razmerje signal/šum, CNR)
	1011	Opazovanja GLONASS L1 in L2
	1012	Razširjena opazovanja GLONASS L1 in L2 (razmerje signal/šum, CNR)
Koordinate referenčne postaje	1005	Koordinate referenčne postaje, ARP
	1006	Koordinate referenčne postaje, ARP in višina antene
Podatki o anteni	1007	Oznaka antene
	1008	Oznaka antene in serijska številka
Dodatne informacije	1013	Sistemski parametri o delovanju, seznam vseh tipov sporočil, ki jih referenčna postaja oddaja, čas in skočne sekunde (ang. Leap seconds)

Standard za zapis podatkov RTCM 3.1 je bil izdan leta 2006 in vključuje nove tipe sporočil za podporo omrežjem GNSS po konceptu MAC, za prenos podatkov o efemeridah GPS in GLONASS ter za pomožna besedilna sporočila. Dodatek 1 k standardu RTCM 3.1, izdan maja 2007, vključuje 8 novih tipov sporočil za prenos transformacijskih in projekcijskih parametrov, dodatek 2 pa še 4 nove tipe sporočil za podporo omrežjem z ne-fizičnimi (izračunanimi) referenčnimi postajami. Dodatek 3 določa način obravnave faze nosilnih valovanj, ki je pri različnih proizvajalcih različna, dodatka 4 in 5 pa dodajata še nove tipe sporočil za podporo mrežnim popravkom za GLONASS (1037, 1038, 1039) ter nove tipe sporočil za podporo predstavitvi mrežnih popravkov s FKP in v prostoru stanj (1057 do 1068).

Preglednica 3: Druge skupine sporočil RTCM 3.

Table 3: Additional groups of RTCM 3 message types.

Skupina	Tip	Vsebina
Mrežni popravki	1014	Koordinatne razlike med pomožno in glavno referenčno postajo
	1015	Ionosferske razlike popravkov GPS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
	1016	Geometrične razlike popravkov GPS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
	1017	Kombinirane ionosferske in geometrične razlike popravkov GPS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
	1018	Rezervirano za alternativno sporočilo z ionosferskimi popravki
	1037	Ionosferske razlike popravkov GLONASS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
	1038	Geometrične razlike popravkov GLONASS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
	1039	Kombinirane ionosferske in geometrične razlike popravkov GLONASS za vse satelite med pomožno in glavno referenčno postajo
Efemeride	1019	Efemeride za sistem GPS
	1020	Efemeride za sistem GLONASS
Transformacije	1021	Transformacijski parametri Helmert/Abridged Molodenski
	1022	Transformacijski parametri Molodenski-Badekas
	1023	Popravki koordinat; predstavitev na elipsoidu ( $\Delta\lambda$ , $\Delta\phi$ , $\Delta N$ )
	1024	Popravki koordinat; predstavitev na ravnini ( $\Delta E$ , $\Delta N$ , $\Delta N$ )
	1025	Projekcijski parametri; razen za LCC2SP ali OM
	1026	Projekcijski parametri; Lambertova konformna stožčna projekcija, LCC2SP
	1027	Projekcijski parametri; poševna Mercatorjeva projekcija, OM
	1028	Rezervirano za globalno transformacijo
Besedilna sporočila	1029	Besedilo v zapisu UTF-8; največ 127 več-bajtnih znakov ali največ 255 bajtov; sporočilo omogoča samodejno pošiljanje obvestil premičnemu sprejemniku v primeru problemov (na primer napačno uporabniško geslo NTRIP, preklon iz mrežnega proizvoda na najbližjo referenčno postajo)
Dodatni mrežni podatki	1030	Preostali (nemodelirani) pogoški v omrežju, GPS
	1031	Preostali (nemodelirani) pogoški v omrežju, GLONASS
Dodatni podatki za ne-fizične referenčne postaje	1032	Koordinate fizične referenčne postaje, ARP; sporočilo se uporablja v primeru individualiziranih, ne-fizičnih konceptov (na primer VRS ali i-MAX) in omogoča premičnemu sprejemniku upoštevanje dejanskega baznega vektorja do fizične referenčne postaje namesto upoštevanja ne-fizične, navidezne reference; sporočilo je podobno sporočilu 1005; v primeru i-MAX so koordinate v sporočilih 1005 (ali 1006) in 1032 enake

Podatki o anteni in sprejemniku	1033	Podatki o referenčnem sprejemniku in anteni; vsebuje tudi podatek o tipu sprejemnika GNSS in različico systemske programske opreme; lahko se uporablja namesto 1007 in 1008
Mrežni popravki FKP	1034	GPS FKP
	1035	GLONASS FKP

RTCM 3.x sporočila od 4001 do 4095 so namenjena lastni uporabi. Organizacija RTCM vsakemu proizvajalcu lahko dodeli en tip sporočila, tako ima na primer proizvajalec Leica Geosystems rezerviran tip sporočila 4092 za pošiljanje lastnih, specifičnih informacij.

Sporočila 1001, 1003, 1005, 1007, 1009 in 1011 vsebujejo najmanjšo količino informacij za potrebe storitev DGNS/RTK. Sporočila 1002, 1004, 1006, 1008, 1010 in 1012 pa vsebujejo še dodatne informacije za izboljšanje kakovosti storitev (izboljšana natančnost, hitrejša inicializacija), seveda za ceno večje potrebne pasovne širine, saj je dolžina sporočil s sodimi oznakami zaradi dodatnih informacij daljša kot dolžina sporočil z lihimi oznakami. Pri tem se lahko sporočila tudi kombinirajo, na primer sporočilo 1003 se pošlje vsako sekundo, sporočilo 1004 z dodatnimi informacijami, ki niso podvržene hitrim spremembam (na primer razmerje signal-šum), pa z daljšim intervalom. Z izbiro ustreznih tipov sporočil v podatkovnem toku lahko ponudniki storitev oblikujejo različne prilagojene proizvode DGNS/RTK. Za najenostavnejši proizvod GPS L1 je potrebno samo sporočilo tipa 1001 skupaj s koordinatami referenčne postaje (1009) in podatki o anteni (1011). Celovit proizvod za potrebe kakovostne geodetske izmere RTK-GNSS, ki vsebuje podatke o opazovanjih GPS in GLONASS na obeh nosilnih valovanjih L1 in L2 ter dodatne informacije, pa na primer sestavljajo sporočila tipov 1004, 1008, 1010, 1012 in 1013. Sporočilo 1013 je namenjeno hitrejšemu začetku z merjenjem (Lin, 2006).

## 2.2 Vplivi na opazovanja GNSS

Kakovost določitve položaja na osnovi opazovanj GNSS je odvisna od kakovosti opazovanj in geometrijske razporeditve opazovanih satelitov. Za opis vpliva geometrije satelit-sprejemnik na natančnost določitve položaja se uporabljajo faktorji DOP (Dilution of Precision). V splošnem se lahko zapiše

$$\sigma_x = DOP \cdot \sigma_P,$$

pri čemer je  $\sigma_x$  standardna deviacija neznanke (položaj, višina, čas),  $\sigma_P$  pa standardna deviacija izmerjene psevdo-razdalje, ki vsebuje vse vplive na opazovanja (Leick, 2004).

Vplivi na opazovanja se lahko razdelijo na štiri glavne kategorije (Sabatini, Palmerini, 2008):

- vplivi z izvorom v satelitu:
  - o pogreški satelitovih ur,
  - o zakasnitve zaradi elektronskih sestavov satelita,
  - o relativistični učinek,
  - o spreminjanje položaja faznega centra satelitove antene,
- vplivi zaradi pogreškov tirnic satelitov,
- vplivi z izvorom v mediju, po katerem se razširja signal:
  - o ionosferska refrakcija,
  - o troposferska refrakcija,
  - o večpotje signala,

- vplivi z izvorom v sprejemniku:
  - pogrešek sprejemnikove ure,
  - zakasnitve zaradi elektronskih sestavov sprejemnika,
  - spreminjanje položaja faznega centra antene.

Drugačen pogled ponujajo Wübbena, Bagge in Schmitz (2001a), ki vplive na opazovanja GNSS delijo na pogreške ur  $\delta C_k^p$ , prostorsko odvisne pogreške (ang. Distance dependent errors)  $\delta D_k^p$  ter pogreške, ki so odvisni od stojišča (ang. Station dependent errors)  $\delta S_k^p$ . Tako se fazno psevdo-razdaljo izraženo v metrih lahko zapiše

$$\Phi_k^p = \rho_k^p + N_k^p \lambda + \delta B_k^p + \varepsilon_\Phi,$$

pri čemer je

$$\delta B_k^p = \delta C_k^p + \delta D_k^p + \delta S_k^p,$$

$\varepsilon_\Phi$  pa so preostali, nemodelirani vplivi na opazovanja.

Pogrešek ur vsebuje pogreške urinih stanj satelitove in sprejemnikove ure  $\delta t$  ter zakasnitve zaradi elektronskih sestavov satelita in sprejemnika  $\delta d$

$$\delta C_k^p = \delta t_k + \delta d_k + \delta t^p + \delta d^p.$$

Pogrešek orbite skupaj z vplivi na razširjanje signala v atmosferi predstavlja prostorsko odvisne pogreške

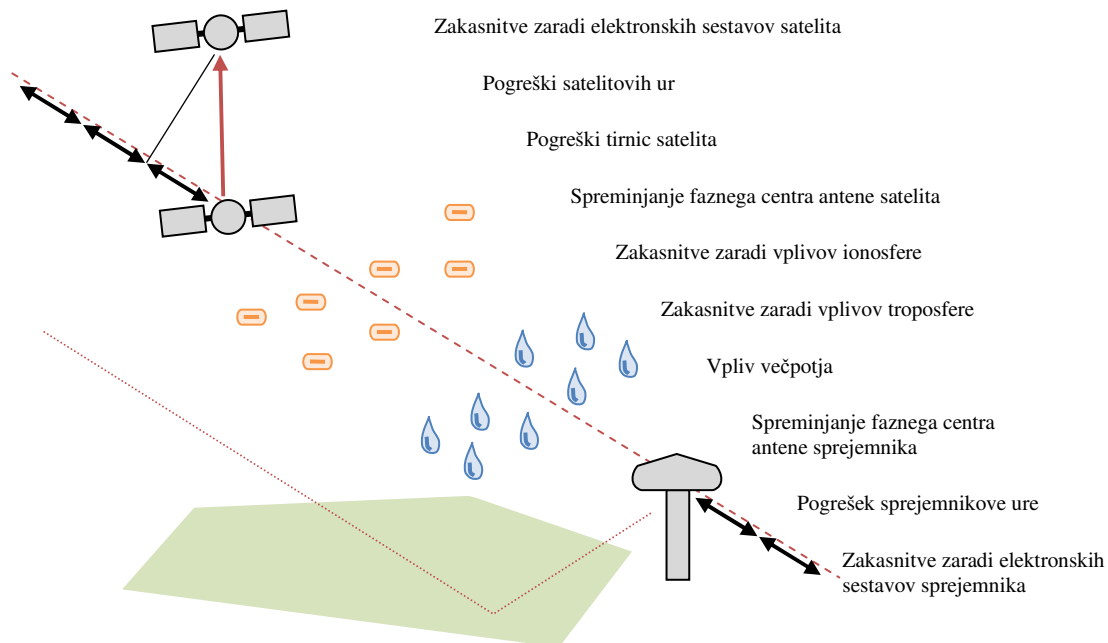
$$\delta D_k^p = \frac{\bar{R}_k^p}{|\bar{R}_k^p|} \delta \bar{\sigma}^p + \delta I_k^p + \delta T_k^p.$$

Ti pogreški se pri kratkih baznih vektorjih izničijo, saj so prostorsko in časovno korelirani.

Variacije faznih centrov anten  $\delta A$  ter vplivi večpotja signala  $\delta M$  pa predstavljajo pogreške, odvisne od stojišča. Lastnost teh pogreškov je, da niso korelirani med postajami, zato jih je do največje možne mere treba zmanjšati ali popraviti (Wübbena in sod., 2001a). Zaradi celovitosti sta prikazana tudi vpliva variacije faznega centra satelitove antene  $\delta E$  in vpliva večpotja na satelitu  $\delta W$

$$\delta S_k^p = \delta A_k^p + \delta M_k^p + \delta E_k^p + \delta W_k^p.$$

Vplivi na opazovanja so grafično predstavljeni na sliki 9, njihova narava, izvor, velikost ter možnosti za zmanjševanje in odpravljanje pa v preglednici 4.



Slika 9: Vplivi na opazovanja GNSS.

Figure 9: GNSS error sources.

Preglednica 4: Lastnosti glavnih vplivov na opazovanja GNSS.

Table 4: Characteristics of main GNSS error sources.

Narava vpliva	Vpliv	Prostorska koreliranost	Izvor	Velikost	Odstranitev, zmanjšanje
Nedisperzen, neodvisen od frekvence	Tirnica satelita	Visoka	Težnost, gravitacija, Sončevo sevanje	100 cm (oddane efemeride), 5 cm (ultra-hitre), 2.5 cm (končne)	Precizne efemeride
	Troposfera	Regijsko (~ 10 km)	Položaj uporabnika, višinski kot satelita	2 m-25 m (90% vpliv suhe, 10% vpliv mokre atmosfere)	Troposferski modeli (zelo dobro za suho atmosfero, mokra je zahtevna za modeliranje)
	Satelitova ura	Enak za isti satelit	Frekvenčni standard, sistemski šum	1.5 m (oddane efemeride), 1 m (ultra-hitre), 2 cm (končne)	Precizne efemeride
	Sprejemnikova ura	Enak za isti sprejemnik	Frekvenčni standard	~ dm do ~ km	Diferencialne in relativne metode izmere
Disperzen, odvisen od frekvence	Ionosfera	Regijsko (~ 10 km)	Položaj uporabnika, čas dneva, Sončeva aktivnost	~ m do 30 m	Ionosferski modeli (za enofrekvenčne sprejemnike; do 50% vpliva), linearne kombinacije opazovanj (za dvofrekvenčne)

					sprejemnike – L3; preostali pogrešek ionosfere do 1 cm)
	Večpotje	Odvisno od lokalne okolice sprejemnika (reflektivne površine)	Tehnologija sprejemnika za sledenje, oblika in vrsta antene, okolje	~ m (opazovanja kode) ~ mm do ~ cm (opazovanja faze)	Tehnologija in algoritmi za odstranjevanje vplivov večpotja
	Fazni center antene	Odvisno od položaja sprejemnika (višinski in smerni kot signala)	Višinski kot satelita, električne fluktuacije	~ cm do dm	Kalibrirana antena, tehnologija antenskega elementa

### 2.2.1 Tirnica satelita

Položaj satelitov GNSS se določi iz efemerid<sup>4</sup>. Tirnica satelita je vnaprej določena, vendar se sateliti zaradi vplivov težnostnega polja Zemlje, Lune in Sonca ter pritiskov Sončevega sevanja (trkov fotonov ob površino satelita) ne gibljejo točno po vnaprej določeni poti. Pogrešek tirnice satelita predstavlja razliko med dejanskim in predvidenim položajem. Predviden položaj satelita se določi na osnovi oddanih efemerid, ki so del navigacijskega sporočila. Pogrešek tirnice se podaja v koordinatnem sistemu satelita. Razstavi se na tri vektorje, pri čemer je ena komponenta v smeri radij vektorja satelita, druga komponenta je normala na ravnino tirnice, tretja komponenta pa leži v ravnini tirnice in je pravokotna na drugi dve komponenti. Največji vpliv na določitev položaja sprejemnika ima odmik dejanskega položaja satelita od predvidenega v smeri zveznice satelit-sprejemnik, saj se neposredno prevede v pogrešek psevdo-razdalje.

Kontrolni segment GNSS vzdržuje in nadzoruje tirnice satelitov ter periodično pošilja satelitom nove parametre tirnic, ki jih le-ti vključijo v svoje navigacijsko sporočilo, zato je vpliv na določitev položaja relativno majhen.

Poleg teh, oddanih efemerid (ang. Broadcast Ephemerides), pa so uporabnikom GNSS na voljo tudi druge vrste efemerid, ki se razlikujejo glede načina in hitrosti pridobitve podatkov. S hitrostjo pridobitve podatkov je povezana natančnost določitve položaja satelita GPS na tirnici, posledično pa tudi dosežena kakovost rezultatov obdelave opazovanj GPS. Ker se oddane efemeride pripravijo vnaprej na osnovi nekaterih predpostavk o gibanju satelitov, je začetna natančnost določitve položaja slabša od preciznih efemerid, ki so določene naknadno (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2004).

Precizne efemeride na osnovi skupne obdelave opazovanj globalnih omrežij GNSS pripravljajo različne organizacije (IGS, NGS, CODE), uporabnikom pa jih posredujejo preko spleta. Glede hitrosti pridobitve in s tem povezano natančnostjo podatkov preciznih efemerid se le-te delijo na:

- najkasneje dostopne, končne precizne efemeride (ang. Final Ephemerides), kamor se uvrščajo efemeride služb IGS in CODE, ki so dostopne od enega do dveh tednov po končani izmeri,
- hitre efemeride, kamor se uvrščajo hitre efemeride IGS (ang. Rapid Ephemerides), znane pod kratico IGR in so na voljo s časovnim zamikom dveh dni, ter

<sup>4</sup> Efemeride v astronomiji pomenijo periodično publikacijo s podatki o legah nebesnih teles. Termin efemeride GNSS se uporablja za predstavitev digitalne publikacije s podatki, potrebnimi za določitev položajev satelitov GNSS.



- najhitreje efemeride (ang. Ultra-rapid Ephemerides), ki se določijo z ekstrapolacijo (to je s predvidevanjem). Služba IGS jih nudi pod kratico IGU, na voljo pa so za dva dneva nazaj in dan vnaprej (Pavlovčič Prešeren, Stopar, 2005).

### 2.2.2 Pogrešek satelitove ure

Čeprav imajo sateliti GNSS nameščene precizne atomske ure, ki jih prav tako nadzorujejo z Zemlje, pa vedno obstajajo manjša odstopanja satelitovih ur od systemskega časa GNSS, ki ga vzdržujejo v kontrolnem centru.

Pogrešek ure satelita neposredno vpliva na izmerjeno psevdo-razdaljo. Njegov vpliv na določitev psevdo-razdalje je neodvisen od medsebojnega položaja satelita in sprejemnika ter je enak za vse signale. V večini primerov je vpliv pogreška satelitove ure zanemarljiv, saj je podatek o stanju ure vsebovan v navigacijskem sporočilu.

### 2.2.3 Zakasnitev zaradi elektronskih sestavov satelita

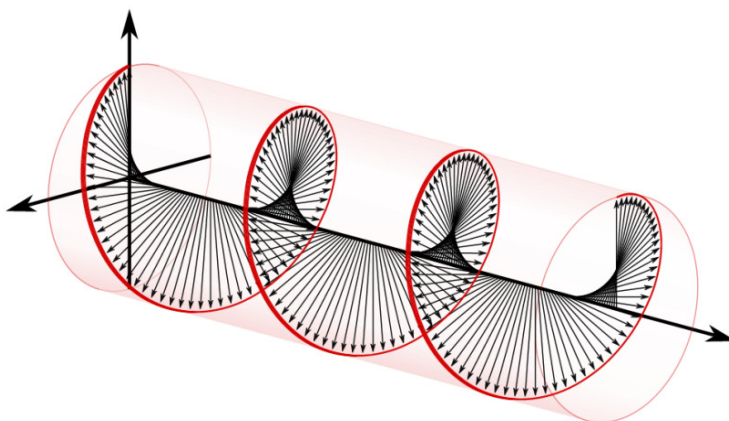
Različne komponente signala se vodijo po različnih strojnih in programskih komponentah satelita, zato se različni signali različno zakasni. Vpliv na določitev psevdo-razdalje je neodvisen od medsebojnega položaja satelita in sprejemnika ter je različen za različne signale.

### 2.2.4 Relativistični učinek

Relativnostna teorija pravi, da čas za hitro premikajoča se telesa teče počasneje. V primeru satelitov GPS, ki se premikajo s hitrostjo skoraj 14.000 km/h, ure tečejo počasneje, kot če bi jih spremljali na Zemlji. Relativistično raztezanje časa vodi do nenatančnosti časa za približno 7.2  $\mu$ s na dan. Po relativnostni teoriji čas teče počasneje tudi, čim bolj je podvržen gravitacijskemu polju. Za opazovalca na zemeljskem površju ura na krovu satelita teče hitreje (satelit je podvržen manjšemu gravitacijskemu polju Zemlje). Ta efekt je šestkrat močnejši od relativističnega raztezanja časa iz prvega primera. Glede na ti dejstvi se zdi, da ure na krovih satelitov tečejo nekoliko hitreje. Razlika časa za opazovalca na Zemlji znaša približno 38  $\mu$ s dnevno, kar vodi do pogreška psevdo-razdalje približno 10 km na dan. V izogib tej napak so ure satelitov že na Zemlji nastavljene na frekvenco 10.22999995453 MHz namesto na osnovno frekvenco 10.23 MHz. Tako je vpliv relativnosti že vnaprej odpravljen (Köhne, Wöbner, 2009).

### 2.2.5 Vpliv medsebojnega vrtenja anten satelita in sprejemnika

Signali, ki jih oddajajo sateliti GNSS, so elektromagnetno valovanje, ki se ga lahko predstavi kot ortogonalno usmerjena vektorja električnega in magnetnega polja, ki sta hkrati pravokotna na smer razširjanja valovanja. Če valovni vektor med širjenjem valovanja ves čas niha v isti ravnini, to je, če se nihajna ravnina valovnega vektorja ne spreminja, je valovanje linearno polarizirano. Če pa se valovni vektor med širjenjem enakomerno vrti okrog osi vzdolž širjenja valovanja, tako da opisuje vijačnico, se takšno valovanje imenuje krožno polarizirano (slika 10).



Slika 10: Pri krožno polariziranem elektromagnetnem valovanju valovni vektor opisuje vijajnico (Wikipedia skupnost).

*Figure 10: Electric field vector of a circularly polarized electromagnetic wave has a constant magnitude but its direction changes in a rotary manner (Wikipedia skupnost).*

Vsi signali GNSS so desnosučno krožno polarizirani. Valovni vektor se vrti proti smeri gibanja urinih kazalcev, gledano v smeri od sprejemnika proti satelitu. Razlog takšne polarizacije je tudi v dejstvu, da se krožno polarizirano valovanje razširja skozi zemeljsko atmosfero brez večjih izgub moči.

Do pojava preskoka faze (ang. Phase Wind-up) pride, če med anteno na satelitu (oddajnik) in anteno na sprejemniku pride do medsebojnega vrtenja, kar neposredno vpliva na opazovanje faze nosilnega signala, saj sprejemnik ne more ločiti, ali gre za spremembo v medsebojni razdalji ali za spremembo zaradi vrtenja. Sateliti GNSS se neprestano vrtijo zaradi nameščanja solarnih panelov v optimalen položaj glede na Sonce. Predvsem pri kinematični izmeri se obrača tudi antena na sprejemniku. Ker se pri tvorjenju dvojnih faznih razlik vpliv skoraj v celoti izniči, se pri relativnih metodah izmere v večini aplikacij zanemari. Vpliv doseže vrednosti nekaj centimetrov le pri zelo dolgih baznih vektorjih (več tisoč km), kjer zaradi ukrivljenosti Zemlje relativni geometriji satelit-sprejemnik nista več enaki. Samo pri metodi izmere PPP pa lahko neupoštevanje vpliva preskoka faze prinese več decimetrski pogrešek. Vpliv preskoka faze pri opazovanjih kode ni prisoten (Petovello, Lachapelle, 2007).

### 2.2.6 Vpliv spreminjanja faznega centra satelitove antene

Položaj faznega centra satelitove antene je podan v koordinatnem sistemu satelita relativno glede na njegovo težišče in se določi za vsak tip satelita že na Zemlji.

Oddane efemeride se nanašajo na fazni center satelitove antene, zato se vse variacije faznega centra izločijo v postopkih tvorjenja faznih razlik. Precizne efemeride in parametri urinih stanj satelitove ure pa se nanašajo na težišče satelita, zato je treba upoštevati odmike faznih centrov.

### 2.2.7 Pogrešek sprejemnikove ure

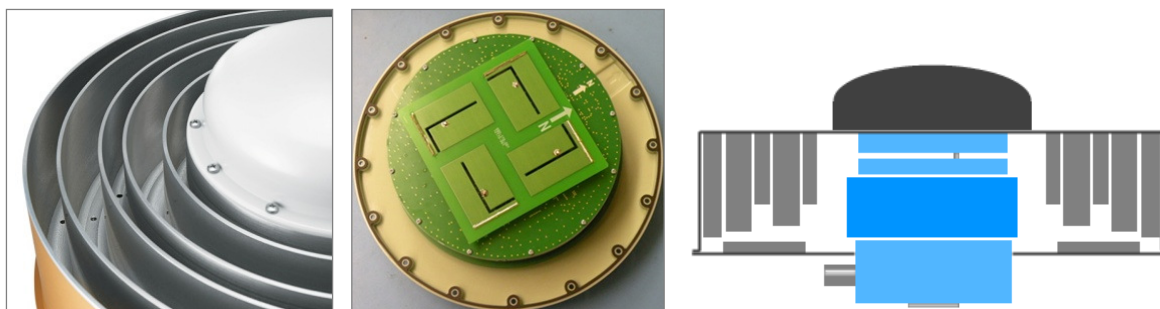
V sprejemnikih GNSS se običajno uporabljajo cenejše ure s kvarčnim oscilatorjem, ki niso tako natančne kot časovni standardi v satelitih. Razlika med uro v sprejemniku in časom GPS se imenuje pogrešek sprejemnikove ure. Vpliv pogreška sprejemnikove ure na določitev psevdo-razdalje je neodvisen od medsebojnega položaja satelita in sprejemnika ter je enak za vse satelite in vse signale. Velikost pogreška sprejemnikove ure se določi skupaj s tremi prostorskimi neznankami v matematičnem modelu za določitev položaja GNSS.

### 2.2.8 Vpliv večpotja

Večpotje je pojav, ko se signal na svoji poti od satelita do sprejemnika odbija od objektov v bližini sprejemnikove antene (zgradbe, strehe, vodne površine). Odbiti signal nato interferira z neposredno sprejetim signalom in povzroča pogreške pri merjenju. Vpliv večpotja na kodne psevdo-razdalje je razreda nekaj metrov, na opazovanja faze pa le nekaj centimetrov. Čeprav so osnova za geodetsko določitev položaja opazovanja faze nosilnega valovanja, pa so točne kodne psevdo-razdalje potrebne za kakovostno začetno določitev položaja sprejemnika.

Vpliv večpotja je odvisen od jakosti signala, višinskega kota, lastnosti antene ter načina obdelave signalov v sprejemniku. Različen je za vsak satelit in se spreminja, ko se spreminja položaj satelita. Vpliva večpotja na referenčnem in premičnem sprejemniku nista korelirana, zato se ju ne da odpraviti s tvorjenjem faznih razlik, njun vpliv pa se sešteva.

Odkrivanje prisotnosti večpotja je dolgotrajno in drago, zato se ga je v primeru izmere RTK-GNSS priporočljivo izogniti predvsem s pazljivo izbiro točk, kjer ni prisotnih odbojnih površin. V primeru izbire lokacij za namestitev (stalnih) referenčnih postaj, pa je treba izvesti večdnevno statično izmero in analizirati opazovanja. Ker so orbite satelitov načrtovane tako, da se vsak satelit pojavi na istem mestu na nebu vsakih 23 ur in 56 minut, se vpliv večpotja manifestira kot periodičen sistematičen vpliv na opazovanja. Sodobne antene in sprejemniki GNSS so načrtovani tako, da je vpliv večpotja v veliki meri zmanjšan. Antene za premične sprejemnike imajo vgrajene dovršene antenske elemente s podnožnimi ploščami, ki preprečujejo sprejem posrednih signalov. Antene na stalnih referenčnih postajah, kakršna je na primer prikazana na sliki 11, pa imajo vgrajene tudi posebej oblikovane dušilne obroče, ki slabijo posredne signale, sprejemniki GNSS pa še izpopolnjene korelatorje ter vgrajene različne tehnike obdelave signalov, ki zmanjšujejo vplive večpotja (Land Professional Group of RICS, 2010).



a) 3D dušilni obroči

b) Antenski element

c) Prečni prerez antene

Slika 11: Sodobna antena GNSS za referenčne postaje Leica AR20. S 3D dušilnimi obroči (a) in ploskovnim antenskim elementom s priključitvijo na 4 točkah (b) zagotavlja najboljšo krožno polarizacijo na vsem frekvenčnem pasu GNSS, stabilnost faznega centra in izjemno odpornost na večpotje (Walford, 2012).

*Figure 11: State of the art GNSS reference antenna Leica AR20. The AR20 contains an inside 3D choke-ring (a) that brings leading edge multipath performance, and antenna element (b) which consists of an array of four individual planar radiating elements that provide superior circular polarization across all GNSS frequency bands and sub-millimeter phase centre stability (Walford, 2012).*

## 2.2.9 Vpliv spreminjanja faznega centra sprejemnikove antene

Fazni center antene je navidezna točka v anteni ali izven same antene, na katero se nanašajo opazovanja GNSS. V elektriškem smislu je fazni center točka zaznavanja signala. Za razliko od točke, katere položaj se določa in je nepremična, pa fazni center antene ni dobro definirana točka. Spreminja se z višinskim kotom, v manjši meri pa tudi z azimutom satelita. Relacije med referenčno točko antene (ang. Antenna Reference Point, ARP), ki je dobro določena mehanska točka, in faznim centrom podajata odmik faznega centra (ang. Phase Center Offset, PCO) ter variacije faznega centra (ang. Phase Center Variations, PCV). Vse vrednosti so odvisne tudi od frekvence nosilnega valovanja. Vrednosti odmikov faznih centrov so največje po višini in lahko znašajo tudi več kot 10 cm, odmiki po položaju pa so reda velikosti milimetrov (Leick, 2004).

Učinek faznega centra antene na opazovanja GNSS povzroča odvisnost izračunane višine točke od višinskega kota satelita, vpliva pa tudi na izračunane parametre troposfere, saj je podoben troposferskim variacijam (odvisnost od višinskega kota). Še posebej je izrazit pri baznih vektorjih, kjer se uporablja merska oprema GNSS različnih proizvajalcev, ter pri dolgih baznih vektorjih, kjer zaradi ukrivljenosti Zemlje višinski kot in azimut satelita na obeh koncih baznega vektorja nista enaka za isti satelit, zato se vpliv ne more izničiti s tvorjenjem faznih razlik (Mader, Weston, 2008).

Referenčna točka antene je definirana v osi antene, navadno na spodnjem robu ohišja. Do te točke se meri višina antene nad talno točko, katere položaj se določa z izmero GNSS. Ameriška geodetska uprava NGS je leta 1994 razvila terensko metodo za kalibriranje anten, pri kateri se določijo odmiki in variacije faznih centrov preizkušane antene relativno na izbrano referenčno anteno (JPL Dorne-Margolin Model T). Pri uporabi relativnih antenskih kalibracij je pomembno, da se pri izmeri uporabljajo samo podatki iz istega vira, saj se le-ti nanašajo na isto referenčno anteno (Leick, 2004).

Wübbena je leta 1996 predlagal terenski postopek za določitev odmikov in variacij faznih centrov anten v absolutnem smislu s pomočjo posebnega nosilca, ki omogoča vrtenje in nagibanje testirane antene, nosilec pa je bil kalibriran z dvema teodolitoma Wild T3000 (Wübbena, 1996). Danes se za ta postopek uporablja poseben robot ali gluha soba. Prednost absolutnih antenskih kalibracij je v dejstvu,

da niso vezane na referenčno anteno, pač pa se vrednosti odmikov in variacij faznih centrov nanašajo na referenčno točko antene.

### **2.2.10 Zakasnitve zaradi elektronskih sestavov sprejemnika**

Različne komponente signala se vodijo po različnih strojnih in programskih komponentah satelita, zato se različni signali različno zakasnujejo. Vpliv na določitev psevdo razdalje je neodvisen od medsebojnega položaja satelita in sprejemnika ter je različen za različne signale.

Zakasnitve zaradi elektronskih sestavov sprejemnika povzročajo probleme, kadar se uporabljajo različne merske kode na istih nosilnih valovanjih (L2C, L2P), ali kadar se pri sledenju signalov GLONASS uporabljajo sprejemniki različnih proizvajalcev (Wübbena, 2008).

#### ***Problem merske kode L2C***

Na vseh satelitih od Block IIR-M dalje je na nosilnem valovanju L2 poleg kode P nanosena tudi druga civilna koda, L2C. Merska koda L2P modulira nosilni signal v fazi, koda L2C pa v kvadraturi, torej zamaknjena za četrtno valovne dolžine ( $90^\circ$ ), saj imata kodi sicer enaka trenutka prehoda. Kadar vsi sprejemniki GNSS sledijo enako kodo na vseh satelitih, ni vpliva zamika faze. Kadar pa se v postopkih določitve položaja uporabljajo različne kode (na primer, ker L2C ni na voljo na vseh satelitih), pa je treba upoštevati  $90^\circ$  zamik faze signala L2C, predno se opazovanje uporabi v postopkih določitve položaja na osnovi opazovanj faze. Dodaten problem se pojavi, ker različni proizvajalci sprejemnikov GNSS različno upoštevajo zamik faze. Nekateri ga odpravljajo z odštevanjem četrtnine valovne dolžine (Trimble, Septentrio, Ashtech), drugi ne (Leica, Javad, Topcon). Nepazljiva uporaba opazovanj kode L2P in L2C brez potrebnega znanja o načinu upoštevanja zamika faze v sprejemniku GNSS lahko privede do težav pri določitvi fazne nedoločenosti (Blume in sod., 2012).

Pri upravljanju omrežij GNSS je še posebej v primerih uporabe merske opreme GNSS različnih proizvajalcev treba v programski opremi nastaviti proizvajalca in tip sprejemnika GNSS, prav tako pa uporabiti sodobne zapise podatkov za prenos popravkov RTK, ki vsebujejo tudi podatek o uporabljenem tipu sprejemnika na referenčni postaji. Brez tega je lahko določitev položaja premičnega sprejemnika nezanesljiva ali pa določitev fazne nedoločenosti sploh ni mogoča (Blume in sod., 2012).

#### ***Problem obdelave signalov GLONASS***

Kombiniranje opazovanj različnih GNSS pomeni večjo razpoložljivost signalov zaradi večjega števila satelitov nad horizontom. Večje število signalov različnih frekvenc, na primer tretjega civilnega signala L5, predstavlja tudi nove možnosti za hiter (takojšen) in zanesljiv izračun fazne nedoločenosti. Vendar pa preprosto vključevanje dodatnih opazovanj v obstoječe funkcionalne modele GPS ni mogoče. Ker se položaji satelitov GNSS navadno upoštevajo kot znane količine v izravnavi, je treba v skupnem funkcionalnem modelu izraziti koordinate vseh satelitov GNSS v istem koordinatnem sistemu (oddane efemeride satelitov GPS so podane v sistemu WGS-84, satelitov GLONASS pa v PZ-90.02). V ta namen so na voljo različni transformacijski parametri med sistemoma, ki ustrezajo večini praktičnih aplikacij. Enako velja tudi za časovno skalo. Časovni trenutki opazovanj in efemerid se morajo za vse satelite in vse signale nanašati na isti izhodiščni čas. Referenčni in premični sprejemnik morata opazovanja izvršiti v istem trenutku, če naj se časovno korelirani vplivi na opazovanja učinkovito izničijo. Sistem GPS uporablja čas GPS, GLONASS pa ruski nacionalni sistemski čas

UTC(SU). Komercialni sprejemniki GNSS običajno uskladijo svojo uro s časom GPS, zato so opazovanja vseh signalov usklajena. Vendar pa se različne oddane efemeride še vedno nanašajo vsaka na svoj sistemski čas. Potrebni podatki za sinhronizacijo časov so shranjeni v navigacijskem sporočilu obeh sistemov GNSS (Takac in sod., 2005).

Signali GLONASS so dodatno podvrženi še vplivom, ki izvirajo iz narave tega sistema. V tem sistemu namreč vsi sateliti oddajajo iste merske kode, ki pa so nanesene na nosilna valovanja z različnimi frekvencami. Takšen način se imenuje frekvenčni sodostop (ang. Frequency Division Multiple Access, FDMA). Vsak satelit GLONASS oddaja svoje signale na eni od 14 (12 operativnih in 2 testni) frekvenc v pasu 1598.0625 MHz-1605.375 MHz (L1) oziroma 1242.9375 MHz-1248.625 MHz (L2). Operativnost je dosežena tako, da po dva antipodna satelita v isti orbiti oddajata na isti frekvenci. Frekvenčno odvisne zakasnitve elektronskih sestavov v sprejemniku so navadno konstantne za dani frekvenčni pas. Ker vsi sateliti GPS oddajajo signale na isti nosilni frekvenci, se v funkcionalnem modelu GPS te zakasnitve običajno obravnava hkrati s pogreškom sprejemnikove ure, oziroma se izničijo v postopkih tvorjenja faznih razlik. Zaradi različnih frekvenc signalov GLONASS in njihove kompleksnejše obdelave pa zakasnitve zaradi elektronskih sestavov niso nujno konstantne. Vpliv se imenuje medkanalna zakasnitev (ang. Inter-Channel Bias, ICB) ter vpliva tako na opazovanja kode kot faze. Prisotnost tega frekvenčno pogojenega vpliva lahko poruši celoštevilčno naravo fazne nedoločenosti, zmanjša zanesljivost inicializacije in kvarno vpliva na natančnost določitve položaja. Zato je treba te vplive kalibrirati v sprejemniku ali vključiti v funkcionalni oziroma stohastični model (Takac in sod., 2005).

Vpliv elektronskih sestavov sprejemnika je v primeru signalov GLONASS odvisen od vsakega posameznega satelita in ima dve komponenti

$$dt_k = dt_{k,GLO} + k^i \cdot \delta h_{GLO}.$$

Prva komponenta  $dt_{k,GLO}$  je splošna zakasnitev signala, odvisna od sistema GLONASS samega in je konstantna, druga ( $k^i \cdot \delta h_{GLO}$ ) pa je odvisna od satelita, ki oddaja signal, in zato frekvenčno odvisna. Pri tem je  $\delta h_{GLO}$  zakasnitev med dvema sosednjima frekvencama,  $k^i$  pa je številka kanala GLONASS. Splošna zakasnitev signala prispeva k pogrešku ure sprejemnika in se odstrani s tvorjenjem dvojnih faznih razlik, kar pa ne velja za frekvenčno odvisen člen.

Medkanalna zakasnitev je odvisna od arhitekture sprejemnika in uporabljenih elektronskih komponent, zato je različna za sprejemnike GNSS različnih proizvajalcev in celo za različne modele istega proizvajalca. Vpliv se izniči z enojnimi faznimi razlikami samo v primeru, da sta referenčni in premični sprejemnik enaka.

Frekvenčno odvisen člen je sicer prisoten tudi v primeru GPS, vendar pa se odstrani s tvorjenjem enojnih faznih razlik, če je uporabljen homogen par sprejemnikov, ali z dvojnimi faznimi razlikami, če je uporabljen heterogen par sprejemnikov, saj vsi sateliti GPS oddajajo na istih nosilnih frekvencah (Al-Shaery in sod., 2012).

Različni avtorji predlagajo določitev a-priori vrednosti medkanalnih zakasnitev  $\delta h_{GLO}$  za vse tipe sprejemnikov GNSS, ki bi jih premični sprejemnik upošteval v pripadajočem opazovanju faze. Po uspešni določitvi neznanega števila celih valov pa bi sprejemnik nato še sam natančno kalibriral medkanalne zakasnitve za vsak konkretni sprejemnik GNSS (Al-Shaery in sod., 2012).

Wanninger (2011) je pokazal, da so medkanalne zakasnitve linearna funkcija frekvence, da so podobne za L1 in L2 ter da so podobne za sprejemnike istega tipa (proizvajalca). Razlike v medkanalnih zakasnitvah med sprejemniki GNSS različnih proizvajalcev lahko v primeru opazovanj faze dosežejo do 5 cm (0.2 ns) za sosednje frekvence, oziroma do 73 cm (2.4 ns) za celoten L1 ali L2 frekvenčni pas. Te vrednosti tako lahko presegajo valovno dolžino nosilnega valovanja (19 cm oziroma 24 cm) ali valovne dolžine pogosto uporabljenih linearnih kombinacij opazovanj (84 cm ali 11 cm), zato je očitno, da je potrebno za zanesljivo določitev neznanega števila celih valov uporabiti vsaj a-priori popravke. Že neupoštevanje medkanalne zakasnitve >1 cm zmanjša delež določitve fazne nedoločenosti za signale GLONASS na samo 30% do 50%.

Nekateri proizvajalci sami določijo razlike v medkanalnih zakasnitvah sprejemnikov različnih tipov (na primer z meritvijo ničelnega baznega vektorja) in vrednosti vgradijo v sistemsko programsko opremo svojih instrumentov. Iz avtorjeve ustne korespondence izhaja, da med različnimi proizvajalci ne poteka izmenjava teh vrednosti, ampak velja neformalni dogovor, da se vrednosti medkanalnih zakasnitev ne spreminjajo med različnimi modeli in različicami sistemske programske opreme, ter se tako zagotavlja (približna) medopravilnost.

### 2.2.11 Vpliv atmosfere

Vsako elektromagnetno valovanje je pri razširjanju skozi Zemljino atmosfero podvrženo različnim vplivom: ukrivljanje poti (refrakcija), zakasnjevanju moduliranega signala in prehitevanju faze nosilnega signala. Vpliv troposfere povzroča predvsem, da se valovanje razširja po krivulji, zaradi česar v mediju opravi daljšo pot kot pri potovanju v vakuumu, kjer potuje po premici. Za frekvence pod 30 GHz se troposfera obnaša nedisperzno, kar pomeni, da velikost troposferske refrakcije ni odvisna od frekvence valovanja. Vpliv ionosfere pa je disperzen – odvisen od frekvence valovanja, ter različno vpliva na nosilni in modulirani signal (Leick, 2004).

#### *Vpliv troposfere*

Troposfera je najnižji del Zemljine atmosfere in predstavlja približno 80% celotne mase atmosfere ter 99% vse vodne pare. Že ime »tropos«, ki pomeni obračanje ali mešanje, pomeni, da se v njej turbulentno mešajo zračne mase. V troposferi se dogaja vreme, značilno pa je tudi hitro padanje temperature z višino. Stanje troposfere opisujejo količine: tlak, temperatura in vlažnost (parcialni tlak vodne pare).

Troposferska refrakcija se deli na suho in mokro komponento

$$T = T_h + T_w.$$

Hidrostatična ali suha komponenta v smeri zenita se imenuje tudi zenitna hidrostatična zakasnitev (ang. Zenith Hydrostatic Delay, ZHD). Velikost vpliva suhe komponente v zenitu znaša približno 2.5 m, kar predstavlja približno 90% celotne troposferske refrakcije, vendar se ga lahko natančno modelira (cm) na osnovi merjenja zračnega tlaka pri sprejemnikovi anteni. Mokra komponenta, ki sicer predstavlja samo 10% troposferske refrakcije (vrednost mokre komponente v zenitu (ang. Zenith Wet Delay, ZWD) znaša približno 0.15 m), pa je posledica vsebovane vodne pare v spodnjem sloju troposfere. Zaradi neenakomerne porazdelitve ter velikega časovnega in prostorskega spreminjanja količine vodne pare je ta komponenta težavna za modeliranje (Leick, 2004).

Vrednost troposferske refrakcije narašča z zenitno razdaljo, saj signali s satelitov nizko nad obzorjem opravijo daljšo pot skozi atmosfero. Ta vpliv lahko znaša tudi več metrov. Zaradi prostorskega gradienta vodne pare je troposferska refrakcija odvisna tudi od azimuta radij vektorja satelit-sprejemnik.

Troposferska refrakcija se aproksimira z empiričnimi modeli, med katerimi so najbolj znani Hopfieldov, modificirani Hopfieldov, Goad- Goodmanov, Niellov in Saastamoinenov. Hopfieldov model predpostavlja enak funkcionalni model za suho in mokro komponento troposferske refrakcije, ki sta določeni kot funkcija višine nad površjem Zemlje. Za satelite, ki niso v zenitu, se uporablja preslikava s funkcijo  $MF = 1/\cos(z)$  (Leick, 2004).

### ***Vpliv ionosfere***

Ionosfera predstavlja zunanji del atmosfere v pasu od 50 km do 1500 km. Zanja je značilna prisotnost nabitih delcev – prostih elektronov in ionov. Še posebej v zgornjem sloju ionosfere je zrak že zelo redek. Ultravijolično in rentgensko sevanje s Sonca v tem sloju izbija zunanje elektrone iz večinoma kisikovih in dušikovih atomov. Predno rekombinirajo, se elektroni nekaj časa prosto gibljejo ter vplivajo na razširjanje elektromagnetnega valovanja.

Velikost ionosferske refrakcije je odvisna od gostote prostih elektronov na poti razširjanja valovanja ter od frekvence valovanja. Število prostih elektronov je definirano z vrednostjo TEC (ang. Total Electron Content), ki predstavlja skupno število prostih elektronov vzdolž poti med satelitom in sprejemnikom v valju s površino osnovne ploskve  $1 \text{ m}^2$ . Količina TEC je odvisna od Sončeve aktivnosti (11-letni cikel povečane aktivnosti), letnih in dnevnih sprememb (vpliv je najmanjši okrog polnoči do 4. ure zjutraj), azimuta in zenitne razdalje satelita ter od položaja opazovališča. Valovanja višjih frekvenc so manj občutljiva, valovanja s frekvenco pod 30 MHz pa se od ionosfere odbijejo.

Vpliv ionosfere na elektromagnetno valovanje se izraža s prehitevanjem faze nosilnega valovanja in zakasnitvijo kode (moduliranega signala), kot je prikazano na sliki 12. Psevdo-razdalja določena na osnovi opazovanj faze je zato krajša, kodna psevdo-razdalja pa daljša od geometrične razdalje med satelitom in sprejemnikom. Velikost vpliva je v obeh primerih enaka

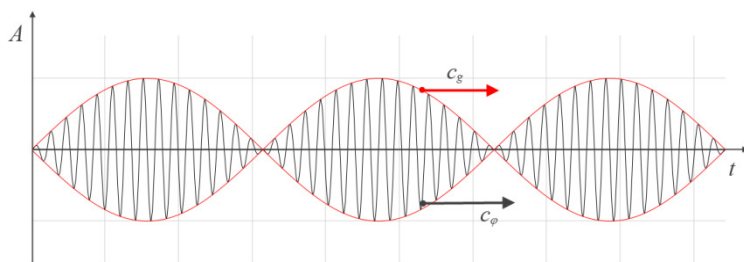
$$I_{f,P} = \frac{40.30}{f^2} TEC = -I_{f,\phi} = -\frac{c}{f} I_{f,\phi},$$

pri čemer sta

$-I_{f,\phi}$  vpliv ionosfere na razširjanje faze nosilnega valovanja izražen v metrih,

$I_{f,\phi}$  pa v enotah valovne dolžine (Leick, 2004).





Slika 12: Razširjanje nosilnega in moduliranega valovanja. Točka na ovojnici potuje s skupinsko hitrostjo  $c_g$ , nosilni signal pa s hitrostjo razširjanja faze  $c_\phi$ . Produkt koeficienta refrakcije in hitrosti razširjanja je enak hitrosti svetlobe  $c_g \cdot n_g = c_\phi \cdot n_\phi = c$ .

Figure 12: Propagation of a wave. The group velocity is the velocity with which the overall shape of the wave's amplitudes (modulation) propagates through space. The group velocity is often thought of as the velocity at which energy or information is conveyed along a wave. The phase velocity is the rate at which the phase of the wave propagates in space.

Iz tega sledijo tudi relacije

$$\frac{l_{1,P}}{l_{2,P}} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \text{ in}$$

$$\frac{l_{1,\phi}}{l_{2,\phi}} = \frac{f_2}{f_1}.$$

Vrednost TEC se pridobi iz empiričnih ali fizikalnih modelov. Empirični modeli so bili izpeljani na osnovi obstoječih opazovanj: satelitskih opazovanj ionosfere, radarskih opazovanj in opazovanj v omrežjih GNSS. Klobucharjev model ter globalne ionosferske karte (ang. Global Ionospheric Maps, GIM) centra CODE sta primera empiričnih modelov, ki skušata opisati variacije ionosfere in omogočata določitev absolutne vrednosti ionosferskega vpliva.

Enofrekvenčni sprejemniki navadno uporabljajo Klobucharjev model ter 8 ionosferskih koeficientov iz navigacijskega sporočila GPS, kar jim omogoča določiti ionosfersko zakasnitev vzdolž poti signala. Model poleg 8 koeficientov uporablja še podatke o položaju sprejemnika, azimutu in višinskem kotu satelita ter čas. Klobucharjev model omogoča odstranitev od 50% do 60% dejanskega vpliva ionosfere (Leick, 2004).

Ker je vpliv ionosfere na razširjanje elektromagnetnega valovanja odvisen od frekvence, se z opazovanji obeh nosilnih valovanj ta vpliv odstrani. Ionosfere-prosta linearna kombinacija tako omogoča odstranitev 99.9% vpliva ionosfere

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot \Phi_{L1} - f_2^2 \cdot \Phi_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}.$$

Alternativno pa se s tvorjenjem geometrije-proste linearne kombinacije lahko vpliv ionosfere oceni

$$\Phi_{GF} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2},$$

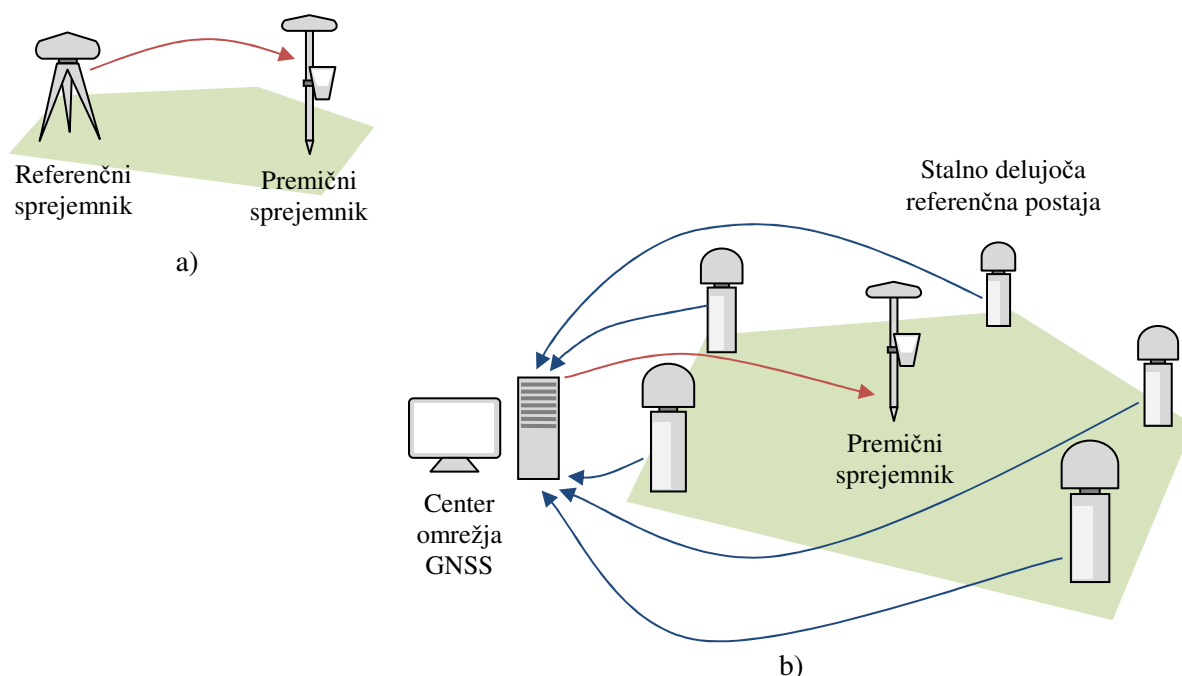
saj se v tej kombinaciji izničijo vsi geometrični vplivi na opazovanja, poleg vpliva večpotja pa ostanejo samo frekvenčno odvisni vplivi (na primer ionosferska refrakcija, vplivi zaradi elektronskih sestavov sprejemnika, vpliv vrtenja antene).

Dodatne možnosti modeliranja vplivov ionosfere ponujajo tudi globalna omrežja GNSS, ki lahko kot enega od (stranskih) proizvodov ponujajo tudi izračunane vplive ionosferske refrakcije, ki so na voljo v obliki proizvodov IONEX na spletu.

## 2.3 Omrežja GNSS

### 2.3.1 Od referenčne postaje do omrežja

Metoda določitve položaja s centimetrsko točnostjo z uporabo opazovanj GPS v realnem času (RTK-GPS) je bila razvita v 90-tih letih prejšnjega stoletja. Vključuje referenčni sprejemnik GPS, ki po komunikacijskem kanalu (na primer VHF- ali UHF-radio, GSM-modem ...) pošilja surova opazovanja kode in faze nosilnega valovanja, oziroma popravke teh opazovanj premičnemu sprejemniku. Obdelava podatkov na premičnem sprejemniku vključuje določitev neznanih začetnih celih valov s pomočjo tvorjenja faznih razlik med opazovanji referenčnega in premičnega sprejemnika GPS ter določitev koordinat premičnega sprejemnika (slika 13a).



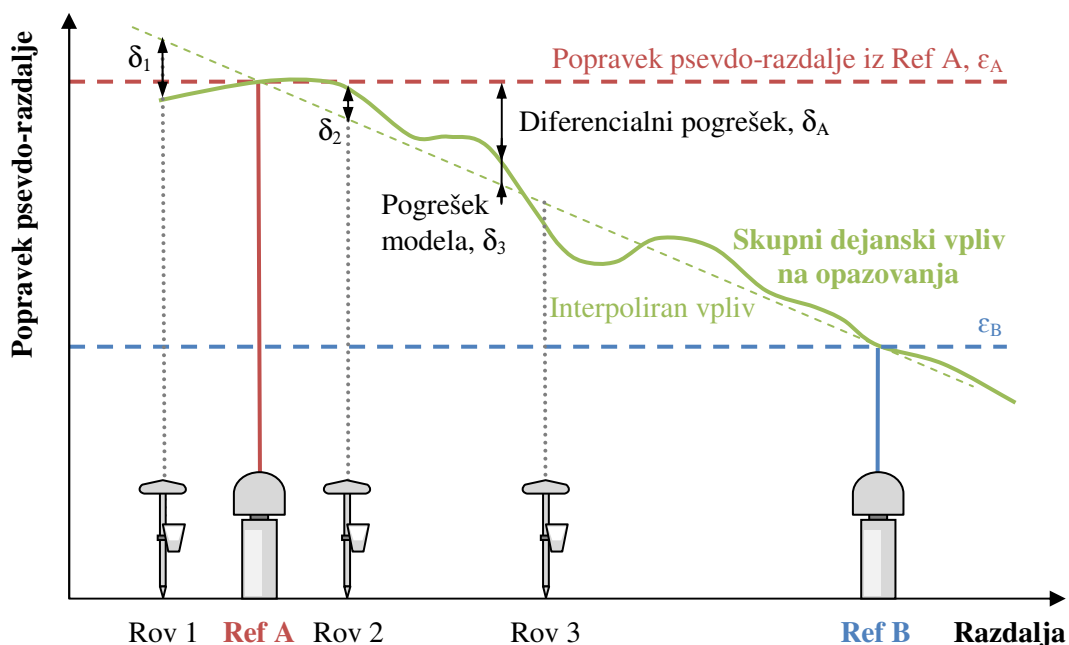
Slika 13: Izmera RTK-GNSS z eno referenčno postajo (a) ter mrežna izmera NRTK-GNSS (b).  
Figure 13: RTK survey with a single reference station (a) and network RTK survey (b).

Pomembna omejitev pristopa z eno referenčno postajo (ang. Single-base RTK) je največja dolžina baznega vektorja, ki ne sme preseči nekaj 10 kilometrov, če se zahteva hitra in zanesljiva inicializacija. Ta omejitev izvira iz vplivov na opazovanja GNSS (predvsem vplivov atmosfere in tirnice satelitov), ki so odvisni od oddaljenosti med obema sprejemnikoma in se v postopkih tvorjenja faznih razlik ne izničijo v celoti. Z naraščajočo oddaljenostjo med sprejemnikoma postajajo vplivi na opazovanja čedalje bolj različni (dekorelirani). Posledica je zmanjšanje točnosti določitve položaja ter otežena ali celo onemogočena (kadar znašajo neodstranjeni vplivi več kot je valovna dolžina nosilnega signala) določitev neznanih začetnih števil celih valov. Te vplive pa je mogoče zanesljivo modelirati s pomočjo opazovanj množice referenčnih postaj GNSS, ki obkrožajo premični sprejemnik, kot je to prikazano na sliki 13b (Wanninger, 2008).

Motivi za vzpostavljanje omrežij GNSS so tudi ekonomski. Wanninger (2008) navaja, da je za območja velikosti 10.000 km<sup>2</sup> potrebnih 30 referenčnih postaj GNSS, da je zagotovljena uspešna izmera RTK-GNSS, vendar samo 5-10 referenčnih postaj, če so le-te povezane v enotno omrežje. Ekonomske prednosti pa so tudi na strani uporabnikov. Uporabnikom omrežja GNSS ni treba kupiti in vzdrževati dodatnega, referenčnega sprejemnika, ni treba postavljati referenčnega sprejemnika, skrbeti za njegovo nemoteno delovanje ves čas izmere s premičnim sprejemnikom niti ni treba vzdrževati baze točk z znanimi koordinatami za potrebe postavitve referenčnega sprejemnika.

Izmera RTK v omrežju referenčnih postaj GNSS (angl. Network RTK, NRTK) zagotavlja homogeno (neodvisno od oddaljenosti od referenčne postaje) in kakovostno določitev položaja. Zanesljivost in razpoložljivost popravkov RTK se doseže s skupno obdelavo vseh opazovanj vseh sprejemnikov v omrežju, modeliranjem sistematičnih vplivov na opazovanja in predstavitvijo teh vplivov kot popravkov RTK za premične sprejemnike.

V omrežju se za vsako referenčno postajo določijo vplivi na opazovanja GNSS. Popravka psevdorazdalje  $\epsilon_A$  in  $\epsilon_B$  na referenčnih postajah A in B lahko predstavljata ionosferske ali geometrične popravke, ali pa oba skupaj. Ker so vplivi prostorsko in časovno korelirani, se lahko vpliv interpolira za položaj premičnega sprejemnika »Rov«. Popravek opazovanj za položaj sprejemnika je modeliran z linearno interpolacijo. Ker noben model ne more v popolnosti opisovati dogajanj v atmosferi in orbiti, od koder izvirajo prevladujoči vplivi na opazovanja, pa med dejanskim in interpoliranim vedno ostane preostali pogrešek – pogrešek modela  $\delta_i$ . Razmere so prikazane na sliki 14. Mrežna rešitev je boljša od klasične rešitve z eno referenčno postajo, če je pogrešek modela  $\delta_i$  manjši od pripadajočega diferencialnega pogreška  $\delta_A$  z ene referenčne postaje. Tako je na primer v bližini referenčne postaje »Rov 2« pristop z eno referenčno postajo boljši, saj se vplivi na opazovanja uspešno odstranijo s tvorjenjem faznih razlik. Izven meja omrežja »Rov 1« pa ekstrapolirani mrežni popravki lahko celo opazno poslabšajo rezultate, zato je v takšnem primeru ugodnejša uporaba najbližje referenčne postaje (Takac, Zelzer, 2008).



Slika 14: Koncept modeliranja vplivov na opazovanja v omrežju referenčnih postaj GNSS.

Figure 14: Concept of modeling distance dependent errors in a GNSS network.

Pogoj za natančno modeliranje prostorsko koreliranih vplivov so fazno določena opazovanja GNSS. Velike razdalje med posameznimi referenčnimi postajami (od 50 km do več kot 100 km) in zahteva po realno-časovni določitvi neznanih začetnih celih števil valov vseh opazovanj do vseh satelitov na vseh postajah predstavlja največji izziv razvijalcem programskih rešitev za omrežja GNSS. Določitev fazne nedoločenosti v omrežju se bistveno razlikuje od običajne inicializacije, ki se odvija v premičnih sprejemnikih GNSS, saj so v primeru omrežja koordinate referenčnih postaj natančno znane. Vsi izzivi izvirajo samo iz vplivov na opazovanja GNSS, zato morajo mrežni algoritmi izkoristiti vse a-priori informacije, ki omogočajo zmanjšanje teh vplivov – od uporabe najhitrejših efemerid, podatkov o kodnih zamikih (ang. Differential Code Bias, DCB), to je zamikih med kodo C1 in P1 ali med P1 in P2, uporabe globalnih kart ionosferske aktivnosti (ang. Ionosphere Map Exchange, IONEX), upoštevati vplive ionosfere in troposfere, določene iz predhodnih obdelav, upoštevati vplive večpotja na opazovanja, določene iz predhodnih obdelav, do uporabe natančnih antenskih kalibracijskih podatkov (Wanninger, 2008).

### 2.3.2 Koncepti omrežij GNSS

Ko osrednji računalnik v centru omrežja pridobi vsa opazovanja referenčnih postaj, najprej določi skupni nivo fazne nedoločenosti (ang. Common Ambiguity Level). Postopek je lasten uporabljeni programski opremi in dobro varovana poslovna skrivnost vsakega proizvajalca. Leica GNSS Spider in Geo++ GNSMART na primer v tem postopku uporabljata surova, nediferencirana opazovanja.

V splošnem se za odstranjevanje vplivov na opazovanja uporabljajo linearne kombinacije in fazne razlike. Tako je bilo na primer že omenjeno, da se z dvojnimi faznimi razlikami med dvema sprejemnikoma in dvema satelitoma odstranijo pogreški urinih stanj satelitove in sprejemnikove ure, nadalje pa tudi drugi skupni (korelirani) vplivi. Vendar pa tvorjenje faznih razlik ne odstranjuje samo pogreškov, ampak tudi informacije, zato nekaterih vplivov na opazovanja s tvorjenjem faznih razlik sploh ni mogoče modelirati. Diferencirana opazovanja pa se tudi nič več ne nanašajo na posamezno referenčno postajo, ampak na bazni vektor med vključenima postajama. Poleg tega postopki tvorjenja linearnih kombinacij opazovanj ojačujejo merilni šum in vpliv večpotja.

V primeru uporabe nediferenciranih opazovanj je treba modelirati in oceniti vse vplive na opazovanja, vključno s pogreški urinih stanj. Takšen pristop je bolj rigorozen, omogoča preprosto dodajanje novih neznank in modelov, zmanjšan pa je tudi vpliv sistema na prekinitve podatkov (Wübbena in sod., 2001). Leica GNSS Spider za določitev neznank obdeluje nediferencirana opazovanja kode in faze v obsežnem Kalmanovem filtru. Poleg neznanih začetnih števil celih valov omrežja se oceni tudi deterministični vpliv ionosfere in troposfere, določijo pogreški urinih stanj satelitove in sprejemnikove ure ter orbit. Za najnatančnejšo določitev vplivov ionosfere in orbit so uporabljeni stohastični modeli. Z vsemi neznankami vektorja stanj (ang. State-space Vector) je na voljo popolna mrežna rešitev. Za določitev fazne nedoločenosti med referenčnimi postajami Leica GNSS Spider uporablja preizkušeno metodo LAMBDA, za neprekinjeno kontrolo fazne nedoločenosti pa lastne algoritme SmartCheck, ki so vgrajeni tudi v sprejemnike GNSS Leica. Ko je omrežje na istem nivoju fazne nedoločenosti, se glede na uporabljen mrežni koncept in proizvod RTK ustrezno pripravijo mrežni popravki RTK (Leica Geosystems, 2005).

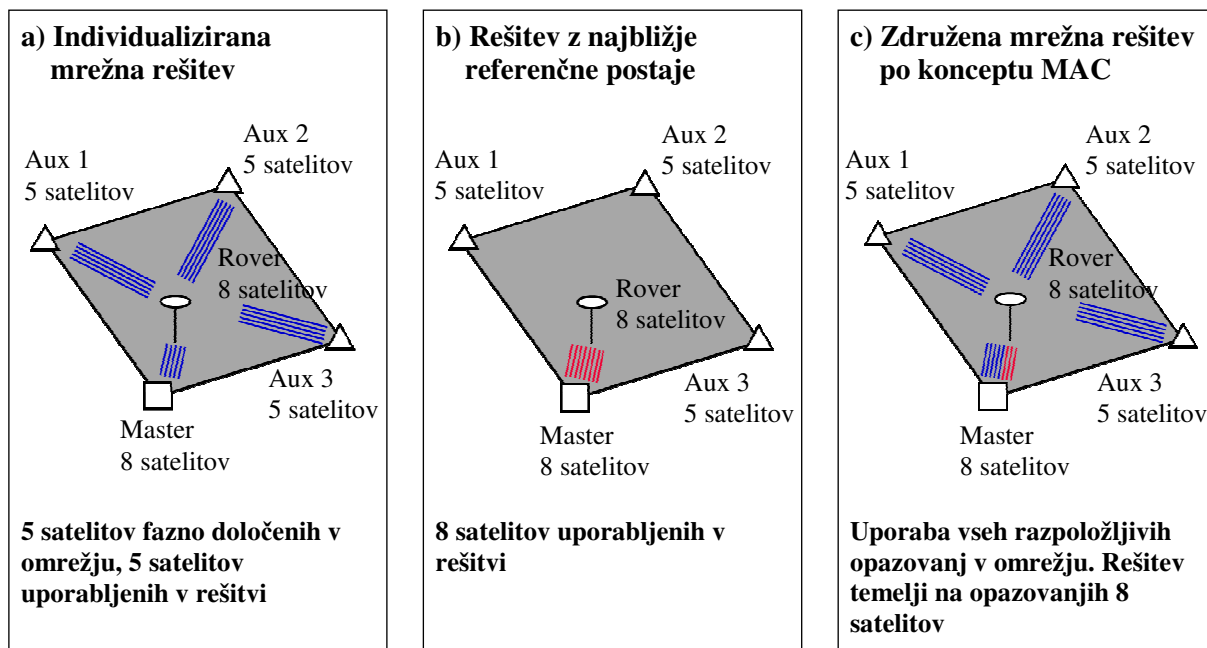
Na tržišču so na voljo programske rešitve za upravljanje omrežij GNSS, ki vključujejo modeliranje in predstavitev vplivov na opazovanja v omrežjih z različnimi koncepti: z navideznimi referenčnimi postajami – Virtual Reference Station (VRS), psevdo referenčnimi postajami – Pseudo-Reference

Station (PRS), ploskovnimi popravki – Flächenkorrekturparameter (FKP) ter koncept Master-Auxiliary (MAC) z mrežnimi popravki MAX in individualiziranimi mrežnimi popravki i-MAX.

Vsi koncepti zmanjšujejo prostorsko odvisne vplive na opazovanja in tako omogočajo večje dolžine baznih vektorjev med referenčno postajo in sprejemnikom, vendar vsak na svoj način. V nadaljevanju so ovrednoteni s stališča standardizacije, mesta, kjer se določi mrežna rešitev (ang. Network Solution), uporabe vseh razpoložljivih opazovanj, sledljivosti, ponovljivosti in skladnosti (Leica Geosystems, 2008b).

Standardiziran koncept je tisti, pri katerem mrežna programska oprema v centru uporablja mednarodno standardizirane algoritme za določitev mrežnih popravkov. Ti algoritmi so objavljeni in na voljo javnosti, kar zagotavlja transparentnost in omogoča tako proizvajalcem programske opreme za upravljanje omrežij GNSS kot proizvajalcem sprejemnikov popolno medopravilnost. Nestandardizirani koncepti pa uporabljajo neobjavljene algoritme in modele, pogosto pa tudi vsebina popravkov RTK ni dokumentirana (delno ali v celoti), zato takšni primeri navadno favorizirajo sprejemnike določenega proizvajalca. MAC je prvi mrežni koncept, ki je standardiziran pod okriljem organizacije RTCM in realiziran v obliki sporočil RTCM 3.1. Nasprotno pa drugi mrežni koncepti (i-MAX, VRS, PRS in FKP), čeprav za prenos popravkov uporabljajo standardna sporočila RTCM, niso skladni s standardom, saj vsebujejo modelirane informacije, FKP pa uporablja lastno sporočilo 59, ki je le delno usklajeno in dokumentirano. Kljub lastnim konceptom za modeliranje in predstavitev vplivov na opazovanja GNSS pa je zaznati željo proizvajalcev po standardizaciji. Tako so na primer v dodatku 4 standarda RTCM 3.1 že vključena in dokumentirana sporočila za mrežne popravke FKP.

Mrežna rešitev se določi na premičnem sprejemniku, če mrežni koncept z obliko in vsebino mrežnih popravkov omogoča le-temu, da sam izbira, katere in koliko referenčnih postaj ter kakšno strategijo bo uporabil za zmanjšanje prostorsko odvisnih vplivov na opazovanja. Pri tem lahko premični sprejemnik določi najkrajši bazni vektor, več baznih vektorjev, interpolira vplive za svoj položaj in pridobi mrežno rešitev ter uporabi tudi opazovanja do satelitov, ki niso fazno določeni v omrežju. V tem primeru premični sprejemnik GNSS sprejme (originalna, nespremenjena) opazovanja kode in faze nosilnega signala ter koordinate vseh okoliških referenčnih postaj. Prednost takšnega koncepta je, da premični sprejemnik lahko neprestano kontrolira kakovost pridobljenega položaja in učinkovitost odstranjevanja vplivov na opazovanja (oceni velikost preostalih pogreškov). Zato lahko v spremenjenih okoliščinah (na primer drugačni atmosferski pogoji, prekinitev toka podatkov z ene od referenčnih postaj, dodatni sateliti, ki jih sledi ena ali več postaj ...) sproti izbere najprimernejšo strategijo za zagotovitev najvišje razpoložljivosti in kakovosti določitve položaja. Kadar pa se izbira referenčnih postaj, modeliranje vplivov na opazovanja in interpolacija za položaj premičnega sprejemnika opravi v centru omrežja, premični sprejemnik GNSS sprejme spremenjena opazovanja. To so opazovanja faze nosilnega signala fizične ali navidezne referenčne postaje, popravljena za interpolirane vplive. Strategija je enaka za vse uporabnike RTK in ni prilagojena dejanskim razmeram na mestu posameznega premičnega sprejemnika (številu satelitov, oddaljenosti od najbližje referenčne postaje, uspešnosti inicializacije in doseženi kakovosti določitve položaja). Ker se v tem primeru ustvarjajo popravki RTK v centru omrežja za vsakega uporabnika posebej (prilagojeni so samo za približni začetni položaj premičnega sprejemnika), se ti koncepti imenujejo tudi individualizirani.



Slika 15: Shematska ponazoritev lastnosti posameznih konceptov in strategij pri določitvi položaja v omrežju GNSS: individualizirana mrežna rešitev (a), rešitev z najbližje referenčne postaje (b) in združena mrežna rešitev (c).

Figure 15: Illustration of the characteristics of different concepts and strategies in determining the GNSS network solution: individualized network solution (a), nearest station solution (b) and unified network solution (c).

Osrednji računalnik zbira podatke vseh referenčnih postaj in pripravlja popravke RTK, ki jih posreduje premičnim sprejemnikom. Predvsem koncepti, pri katerih popravki RTK simulirajo eno referenčno postajo (i-MAX, VRS, PRS) ne omogočajo popolnega izkoristka vseh razpoložljivih opazovanj. Če na primer premični sprejemnik in okoliške referenčne postaje sledijo 8 satelitov, le ena od referenčnih postaj pa 5 satelitov, je pri individualiziranih konceptih običajno mogoče pripraviti mrežne popravke za samo 5 (skupnih) satelitov. Tako lahko kljub odličnim terenskim pogojem premični sprejemnik občuti težave pri pridobivanju kakovostnega položaja in hitri inercializaciji. Razmere pri različnih mrežnih konceptih so prikazane na sliki 15.

Sledljivost je uveljavljen pojem pri vseh vrstah meritev. V primeru geodetske izmere to pomeni, da se mora vsaka meritev nanašati na fizično izhodišče (točko). Samo takšne meritve je mogoče tudi neposredno ponoviti (izmeriti enak bazni vektor). Pri tem se razlikujejo tudi nekateri sorodni koncepti, na primer i-MAX in VRS. Oba koncepta sta nestandardna, mrežna rešitev se pripravi na osrednjem računalniku, vendar pa se individualizirani popravki v primeru VRS nanašajo na navidezno, ne-fizično referenčno postajo, ki jo programska oprema ustvari v bližini premičnega sprejemnika, v primeru i-MAX pa se popravki nanašajo na fizično referenčno postajo, zato je mogoče takšno meritev kadar koli ponoviti.

Pri izmeri RTK-GNSS z eno referenčno postajo natančnost določitve položaja premičnega sprejemnika pada z oddaljenostjo od referenčne postaje. Izmera RTK v omrežju GNSS te vplive zmanjšuje, zato so pridobljeni rezultati med seboj bolj skladni in homogene natančnosti. Problem skladnosti se pojavlja na primer pri VRS, kjer se v primeru dinamičnih aplikacij zaradi premikanja navidezne postaje (ustvarjanju nove navidezne postaje) lahko pojavijo skoki v položaju.

Preglednica 5: Ovrednotenje štirih različnih mrežnih konceptov (Leica Geosystems, 2008b).  
Table 5: Summary of the evaluation of four network RTK methods (Leica Geosystems, 2008b).

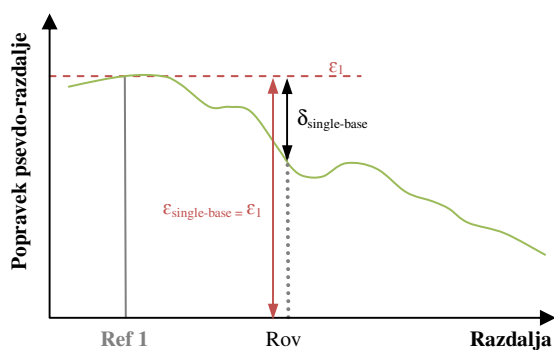
Lastnost \ Mrežni koncept	Zmanjševanje prostorsko koreliranih vplivov na opazovanja	Stedljivost in ponovljivost	Skladnost, homogenost	Uporaba vseh razpoložljivih opazovanj	Standardiziran koncept	Mrežna rešitev se določi na premičnem sprejemniku
VRS	Da	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
i-MAX	Da	Da	Da	Ne	Ne	Ne
FKP	Da	Da	Da	? * <sup>1</sup>	Da * <sup>2</sup>	Ne
MAC	Da	Da	Da	Da	Da	Da

\*<sup>1</sup> Ker gre za nestandardiziran koncept, ni očitno ali so uporabljena vsa razpoložljiva opazovanja.

\*<sup>2</sup> RTCM 3.1 Dodatek 5: dodana sporočila za mrežne popravke FKP

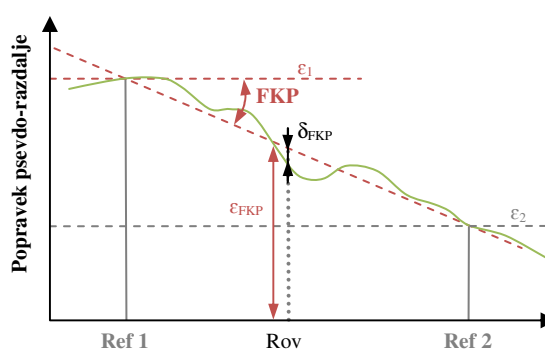
Glede na mrežni koncept se vplivi na opazovanja modelirajo in interpolirajo v podatkovnem centru omrežja ali v premičnem sprejemniku. Zato je razmerje med omrežjem GNSS in premičnim sprejemnikom različno, to pa lahko privede tudi do opaznih razlik v kakovosti določitve položaja, zanesljivosti, sledljivosti in razpoložljivosti. Premični sprejemnik mora poznati procese v podatkovnem centru omrežja ter oceno preostalih vplivov na opazovanja, ki jih omrežje ne zmore odstraniti, da lahko pridobi optimalno rešitev. Uporaba nestandardnih modelov, nedokumentiranih in nestandardiziranih zapisov podatkov zato pogosto neugodno vpliva na kakovost določitve položaja na premičnem sprejemniku (Takac, Zelzer, 2008).

Povzetek vrednotenja posameznih mrežnih konceptov je predstavljen v preglednici 5.



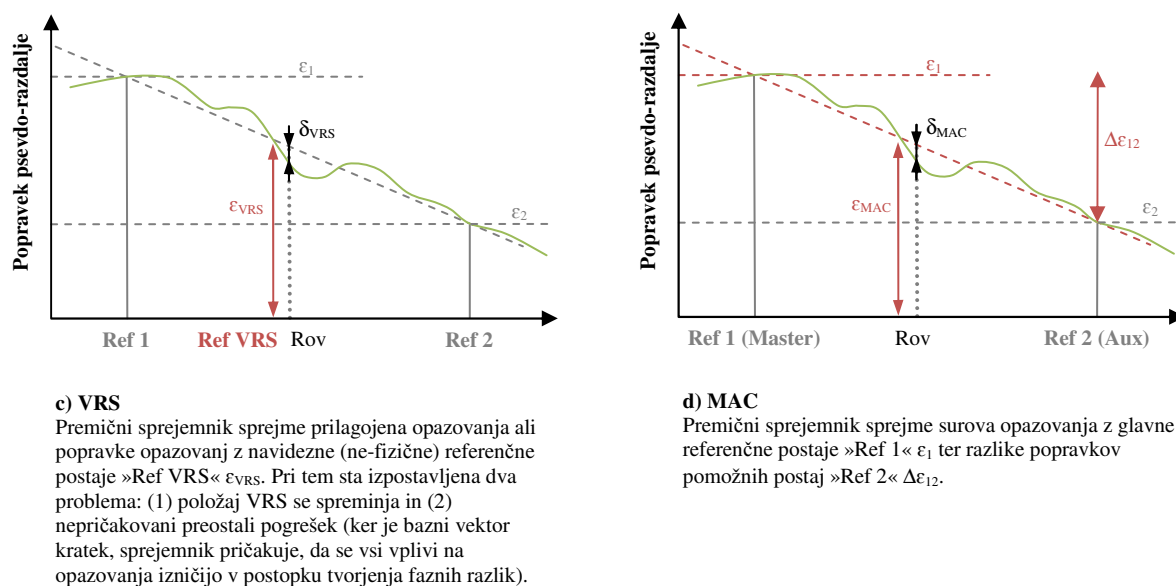
**a) Ena referenčna postaja**

Premični sprejemnik sprejme surova opazovanja ali popravke opazovanj z »Ref 1«  $\epsilon_1$ .  $\delta_{\text{single-base}}$  predstavlja razliko med vplivi na opazovanja na referenčni postaji in dejanskimi vplivi na položaju premičnega sprejemnika.



**b) FKP**

Premični sprejemnik sprejme surova opazovanja ali popravke opazovanj z »Ref 1«  $\epsilon_1$  ter koeficiente prostorskih ploskev FKP.



Slika 16: Grafični prikaz predstavitve popravkov pseudo-razdalj v primeru rešitve z eno referenčno postajo ter mrežnimi koncepti FKP, VRS in MAC. Povzeto in prirejeno po (Wübbena, 2008).

Figure 16: Sum of all errors represents corrections to observables determined at the reference station. In GNSS networks corrections are interpolated for the rover position. Traditional approach using single reference station (a) and three different network representation techniques are shown: area correction parameters – FKP (b), virtual reference station – VRS (b) and Master-Auxiliary concept – MAC (c). Adapted from (Wübbena, 2008).

Velikost preostalega pogreška (to so vsi nemodelirani vplivi na opazovanja GNSS) opazno vpliva na kakovost določitve položaja premičnega sprejemnika. V primeru MAC lahko premični sprejemnik oceni velikost nemodeliranih vplivov kot stranski produkt modeliranja vplivov za svoj položaj, pri drugih mrežnih konceptih pa mora omrežje vključiti oceno preostalih vplivov v sporočilih RTK. Temu sta namenjeni sporočili RTCM 3.x 1030 in 1031 (Takac, Zelzer, 2008).

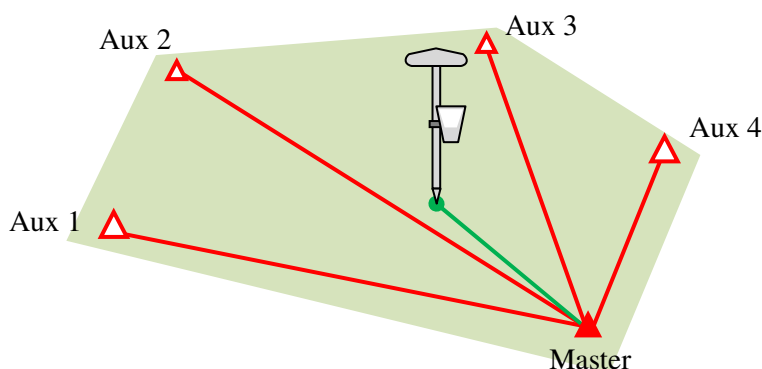
Način predstavitve popravkov RTK v primeru rešitve z eno referenčno postajo ter različnimi mrežnimi koncepti je prikazan na sliki 16.  $\epsilon_{\text{single-base}}$  je popravek pseudo-razdalje z ene referenčne postaje,  $\epsilon_{\text{FKP}}$ ,  $\epsilon_{\text{VRS}}$ ,  $\epsilon_{\text{MAC}}$  pa so popravki pseudo-razdalj, interpolirani za položaj premičnega sprejemnika.  $\delta_{\text{single-base}}$ ,  $\delta_{\text{FKP}}$ ,  $\delta_{\text{VRS}}$ ,  $\delta_{\text{MAC}}$  so odstopanja med dejanskimi ter modeliranimi vplivi na opazovanja (ang. Representation Error).

### 2.3.3 Koncept Master-Auxiliary

Pri konceptu Master-Auxiliary (MAC) je določitev vplivov na opazovanja za položaj premičnega sprejemnika na strani le-tega. V osnovi mrežni popravki MAC sestojijo iz opazovanj vseh referenčnih postaj v mreži, popravljenimi za pogreške sprejemnikovih ur in skupno fazno nedoločenost. Zaradi velikega števila referenčnih postaj, ki so lahko vključene v omrežje GNSS, zaradi omejitev s pasovno širino ter zato, ker zelo oddaljene referenčne postaje (več kot 50 km-100 km) ne prispevajo dodatne informacije o lokalnih vplivih na opazovanja, se za pripravo mrežnih popravkov MAC uporablja le del celotnega omrežja. Podmnožico referenčnih postaj predstavlja celica, ki jo sestavljajo glavna postaja



(ang. Master) in  $k$  pomožnih postaj (ang. Auxiliary), pri čemer gre za pazljivo izbrane<sup>5</sup> najbližje okoliške referenčne postaje, kot je to prikazano na sliki 17 (Brown in sod., 2006).



Slika 17: V primeru omrežja po konceptu MAC sprejema premični sprejemnik opazovanja vseh postaj v celici.  
*Figure 17: In the Master-Auxiliary concept the network RTK server sends full raw observations for the master station and ambiguity reduced observations for a suitable subset of other stations – the auxiliary stations.*

Osnovna ideja koncepta je torej preseliti velik del inteligence iz centralnega računalnika omrežja GNSS na premični sprejemnik, saj edino ta razpolaga tudi s svojimi lastnimi opazovanji in tako omogoča pridobitev najbolj kakovostnega položaja glede na dejanske razmere. Da pa je zaradi omejitev pasovne širine mogoče prenesti obsežno količino surovih opazovanj glavne in pomožnih referenčnih postaj, je zmanjševanje količine podatkov vgrajeno že v sam koncept, učinkovito pa se izkorišča tudi kompaktnost zapisa RTCM 3<sup>6</sup>. V nadaljevanju je predstavljen način priprave mrežnih popravkov po konceptu MAC.

Opazovanje faze nosilnega valovanja  $i$  med referenčno postajo  $m$  in satelitom  $q$  se v razširjeni obliki zapiše

$$\Phi_{m,i}^q = \rho_m^q + cdt_m - cdt^q - \hat{I}_{m,i}^q - \delta I_{m,i}^q + \hat{T}_m^q + \delta T_m^q + \frac{\hat{r}_m^q}{|\hat{r}_m^q|} \delta \hat{r}^q + N_{m,i}^q \lambda_i + \varepsilon_{m,i}^q,$$

pri čemer so

$\rho_m^q$  geometrična razdalja med referenčno postajo in satelitom, izračunana iz podatkov oddanih efemerid, ki vključuje tudi variacije faznega centra antene,

$c$  hitrost svetlobe,

$dt_m, dt^q$  pogrešek urinega stanja sprejemnikove in satelitove ure,

<sup>5</sup> Način izbire glavne in pomožnih referenčnih postaj je za primer programske opreme Leica GNSS Spider opisan v poglavju *Sistemska arhitektura in delovanje programa Leica GNSS Spider*.

<sup>6</sup> Ker tipična razdalja od satelita GPS znaša med 20000 in 26000 km, je spremenljivi člen, ki odraža spremembe v geometriji sprejemnik-satelit mnogo manjši. Tako se na primer kodna psevdo-razdalja za opazovanje GPS L1 prenese kot opazovana psevdo-razdalja modulo 1 svetlobna ms, ki znaša 299792.458 m, celi del pa sprejemnik rekonstruira iz znanih koordinat referenčne postaje ali iz razširjenega sporočila. Sporočili 1001 »GPS Basic RTK, L1 Only« in 1002 »GPS Extended RTK, L1 Only« obe vsebujeta podatkovno polje »GPS L1 Pseudorange« (DF011), vendar pa razširjeno sporočilo 1002 vsebuje še podatkovno polje »GPS Integer L1 Pseudorange Modulus Ambiguity« (DF014), tako da sprejemnik lahko takoj določi opazovano psevdo-razdaljo med referenčnim sprejemnikom in satelitom (RTCM, 2009).

- $\hat{T}_m^q$  modeliran vpliv troposferske refrakcije na razširjanje signala,  
 $\delta T_m^q$  preostali vpliv troposferske refrakcije,  
 $\hat{I}_{m,i}^q$  modeliran frekvenčno odvisen vpliv ionosferske refrakcije na razširjanje signala,  
 $\delta I_{m,i}^q$  preostali vpliv ionosferske refrakcije,  
 $\vec{r}_m^q$  vektor referenčna postaja (antena)-satelit,  
 $\delta \vec{r}^q$  pogrešek orbite iz navigacijskega sporočila (ang. Broadcast orbit error),  
 $\lambda_i$  valovna dolžina nosilnega valovanja,  
 $N_{m,i}^q$  neznano število celih valov in  
 $\varepsilon_{m,i}^q$  drugi naključni vplivi na opazovanja.

Pri konceptu MAC so mrežni popravki predstavljeni kot enojne fazne razlike popravkov opazovanj faze (ang. Correction Differences) za vse pomožne referenčne postaje  $k$  glede na glavno referenčno postajo  $m$ . Enojna fazna razlika med referenčnima postajama se zapiše kot

$$\Delta \Phi_{mk,i}^q = \Phi_{k,i}^q - \Phi_{m,i}^q$$

$$\Delta \Phi_{mk,i}^q = \Delta \rho_{mk}^q + cdt_{mk} - \Delta \hat{I}_{mk,i}^q - \Delta \delta I_{mk,i}^q + \Delta \hat{T}_{mk}^q + \Delta \delta T_{mk}^q + \Delta \delta r_{mk}^{q,BE} + \Delta N_{mk,i}^q \lambda_i + \Delta \varepsilon_{mk,i}^q,$$

pri čemer je  $\Delta \rho_{mk}^q = \rho_k^q - \rho_m^q$  geometrična razdalja enojnih faznih razlik, ki vključuje tudi variacije faznih centrov anten in vpliv večpotja, ki so določeni in upoštevani že v predhodni obdelavi opazovanj. Analogno so določeni tudi ostali členi enačbe (Takac, Lienhart, 2008).

Na ta način se količina podatkov, potrebnih za prenos od omrežja do premičnega sprejemnika, občutno zmanjša, saj se celotna opazovanja prenesejo samo za glavno postajo, za pomožne postaje pa se prenesejo le razlike opazovanj relativno na glavno postajo.

Za dodatno zmanjšanje količine podatkov, potrebne za prenos, se namesto opazovanj prenašajo popravki opazovanj faze v smislu sporočila 20 (RTCM 2.3)<sup>7</sup>. Popravki enojnih faznih razlik se tvorijo tako, da se od opazovanj enojnih faznih razlik odštejejo izračunane vrednosti za geometrijsko razdaljo, pogrešek sprejemnikove ure in začetno neznano celo število valov, tako da je

$$\delta \Delta \Phi_{mk,i}^q = \Delta \Phi_{mk,i}^q - \Delta \rho_{mk}^q - cdt_{mk} - \Delta N_{mk,i}^q \lambda_i,$$

<sup>7</sup> Popravek opazovanja faze (RTCM sporočilo 20) za signal L1 za sprejemnik  $A$  in satelit  $j$  je določen kot razlika izračunane geometrijske razdalje in fazne psevdorazdalje popravljene za vpliv ure sprejemnika in ure satelita

$$\delta \Phi_{A,1,RTCM}^j = s_A^j(t) - \Phi_{A,1}^j(t) + c \cdot dt_{A,1,\Phi} - c \cdot dt_{1,\Phi}^j + \lambda_1 \cdot N_{A,1}^j.$$

V izogib velikim vrednostim popravka opazovanj faze se začetna cela vrednost period signala od satelita do sprejemnika  $N_{A,1}^j$  določi na primer tako, da opazovanje faze kar najbolje odraža teoretično razdaljo med satelitom in sprejemnikom v trenutku, ko je sprejemnik prvič pridobil signal s satelita. Skladno s standardom popravki opazovanj ne smejo biti popravljene za vplive ionosfere in troposfere. Geometrična razdalja med položajem sprejemnikove antene in položajem satelita  $s_A^j(t)$  se izračuna iz navigacijskega sporočila (RTCM 10402.3:2010).

pri čemer sta

$\delta\Delta\Phi_{mk,i}^q$  popravek enojne fazne razlike med glavno postajo  $m$ , pomožno postajo  $k$  in satelitom  $q$  na nosilnem valovanju  $i$  ter

$\Delta N_{mk,i}^q$  celoštevilčna vrednost fazne nedoločenosti enojnih faznih razlik.

Vpliv ure satelita v enačbi ne nastopa, saj je že odstranjen v postopku tvorjenja enojnih faznih razlik (Takac, Lienhart, 2008).

Z združitvijo enačbe popravkov opazovanj faze in enačbe enojnih faznih razlik med glavno postajo  $m$  in pomožno postajo  $k$ , se za popravek enojnih faznih razlik  $\delta\Delta\Phi_{mk,i}^q$  dobi

$$\Delta\Phi_{mk,i}^q - \Delta\rho_{mk}^q - cdt_{mk} - \Delta N_{mk,i}^q \lambda_i = \Delta\hat{T}_{mk}^q + \Delta\delta T_{mk}^q + \Delta\delta r_{mk}^{q,BE} - \Delta\hat{I}_{mk,i}^q - \Delta\delta I_{mk,i}^q + \Delta\varepsilon_{mk,i}^q.$$

Leva stran enačbe vsebuje opazovanja in znane (izračunljive) količine. Popravek sprejemnikove ure  $dt_{mk}$  je konstanten za vsa opazovanja, ki se nanašajo na bazni vektor  $mk$ , vpliv variacije faznega centra je odstranjen z uporabo absolutnih antenskih kalibracij, geometrijska razdalja pa se izračuna iz znanih koordinat referenčne postaje in efemerid iz navigacijskega sporočila. Desna stran enačbe pa predstavlja vsoto modeliranih ( $\Delta\hat{T}$ ,  $\Delta\hat{I}$ ) in preostalih ( $\delta\hat{T}$ ,  $\delta\hat{I}$ ,  $\delta r$ ,  $\Delta\varepsilon$ ) vplivov na opazovanja. Njena vsota je natančno znana, saj se lahko določi iz leve strani. Cilj bi bil, da se v podrobnosti opišejo vse modelirane neznanke, kar je potrebno za popolno medopravilnost (programska oprema v centru omrežja različnih proizvajalcev, premični sprejemniki GNSS različnih proizvajalcev), kar pa je v okviru standarda praktično nemogoče. Poleg tega so modeli vplivov na opazovanja tudi stvar neprestanih izboljšav, vsako novo dognanje pa bi bilo podvrženo dolgotrajnemu in zahtevnemu usklajevanju pod okriljem RTCM. V izogib tej težavi koncept MAC predpostavlja pošiljanje celotne desne strani enačbe kot ene vseobsegajoče vrednosti (Euler in sod., 2001).

Vsota vseh vplivov na opazovanja je torej znana, če je znano začetno število celih valov enojnih faznih razlik  $\Delta N_{mk,i}^q$ . Ob predpostavki, da mrežna programska oprema uspešno določi vse fazne nedoločenosti med vsemi pari referenčnih postaj kot cela števila, se lahko fazna nedoločenost odstrani iz originalnih opazovanj faze (Lin, 2006).

Med dvema referenčnima postajama obstaja samo ena prava vrednost fazne nedoločenosti dvojnih faznih razlik za en par satelitov in eno nosilno valovanje. Vendar pa so razlike popravkov definirane kot enojne fazne razlike med dvema referenčnima postajama.

Iz zapisa dvojnih faznih razlik med sprejemnikoma  $m$  in  $k$  ter satelitom  $q$  in referenčnim satelitom  $ref$

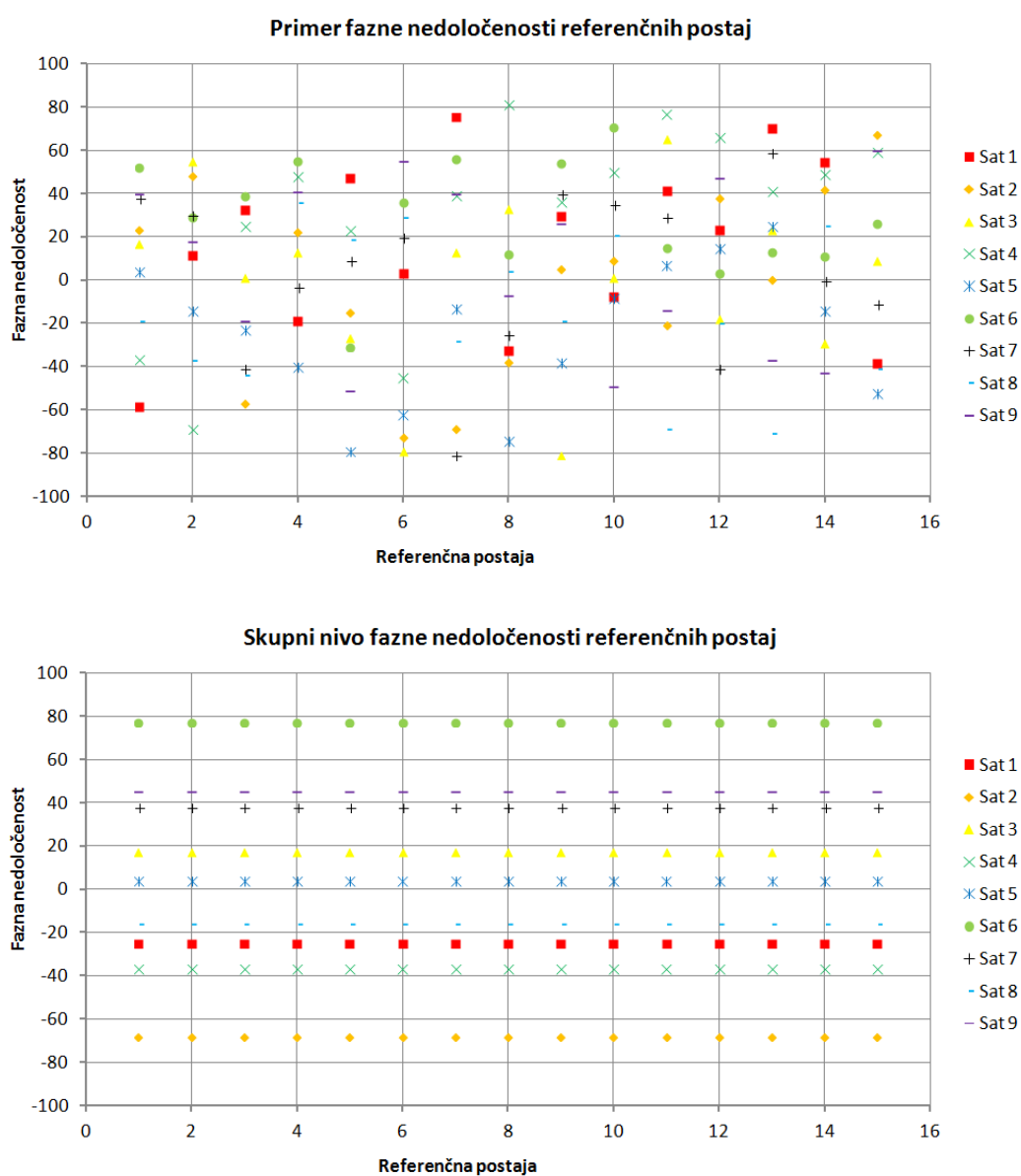
$$\nabla\Delta N_{mk,i}^{q,ref} = \Delta N_{mk,i}^q - \Delta N_{mk,i}^{ref}$$

sledi, da je fazna nedoločenost enojnih faznih razlik  $\Delta N_{mk,i}^q$  znana samo, če je znana fazna nedoločenost enojnih faznih razlik do referenčnega satelita

$$\Delta N_{mk,i}^q = \Delta N_{mk,i}^{ref} + \nabla\Delta N_{mk,i}^{q,ref}.$$

$\Delta N_{mk,i}^{ref}$  je zato poljubno izbrano celo število, ki je enako za vse ocenjene fazne nedoločenosti baznega vektorja  $mk$ , to je za vse satelite, in se imenuje nivo fazne nedoločenosti (ang. Ambiguity Level). V vseh pripadajočih razlikah popravkov zato predstavlja zgolj konstantno odstopanje, ki se na preničnem sprejemniku oceni kot modificiran vpliv ure ali odstrani s postopkom tvorjenja dvojnih faznih razlik. S tem je fazna nedoločenost odstranjena iz originalnih opazovanj faze in ustvarjen je skupni nivo fazne nedoločenosti, kar je pogoj za delovanje omrežja (Takac, Lienhart, 2008).

Določitev skupnega nivoja fazne nedoločenosti pa ima še eno prednost. Če je prvotno v omrežju z  $r$  referenčnimi postajami, ki hkrati sledijo  $s$  satelitov,  $r \times s$  neznanih celih števil valov, pa je po vzpostavi skupnega nivoja v modelu le še po eno neznano število celih valov za vsak satelit, kar je razvidno tudi iz slike 18. Tako je število neznank v modelu občutno zmanjšano.



Slika 18: Grafičen prikaz fazne nedoločenosti referenčnih postaj (zgoraj) in skupnega nivoja fazne nedoločenosti v omrežju GNSS (spodaj). Povzeto po (Euler in sod., 2002).

Figure 18: Example of reference station ambiguities (top) and common ambiguity level for all reference stations in a GNSS network (bottom). Adapted from (Euler in sod., 2002).

Tok podatkov iz omrežja torej vsebuje originalna opazovanja faze nosilnega valovanja (ali popravke opazovanj) glavne postaje  $m$  ter popravke enojnih faznih razlik pomožnih postaj 1, 2 ...  $k$  glede na glavno postajo za vse satelite  $q$  ter za vsa nosilna valovanja  $i$  (Euler, Zebhauser, 2003)

$$\Phi_{m,i}^q, \delta\Delta\Phi_{m1,i}^q, \delta\Delta\Phi_{m2,i}^q \dots \delta\Delta\Phi_{mk,i}^q,$$

pri čemer sta

$$\delta\Delta\Phi_{mk,1}^q = \Delta\Phi_{mk,1}^q - \Delta\rho_{mk}^q - cdt_{mk} - \Delta N_{mk,1}^q \lambda_1 \text{ in}$$

$$\delta\Delta\Phi_{mk,2}^q = \Delta\Phi_{mk,2}^q - \Delta\rho_{mk}^q - cdt_{mk} - \Delta N_{mk,2}^q \lambda_2,$$

iz katerih lahko premični sprejemnik rekonstruira originalna opazovanja faze vseh pomožnih referenčnih postaj

$$\Phi_{1,i}^q, \Phi_{2,i}^q \dots \Phi_{k,i}^q.$$

Pojem razlike popravkov, kot ga uvaja koncept Master-Auxiliary, torej predstavlja enojne fazne razlike med dvema referenčnima postajama (glavno in pomožno), reducirane za geometrično razdaljo, pogrešek sprejemnikove ure in neznano število celih valov, ali z drugimi besedami popravke enojnih faznih razlik z določenim nivojem fazne nedoločenosti.

Pogled na enačbo za razlike popravkov pa ponuja še eno možnost predstavitve vplivov na opazovanja.

$$\begin{array}{c} \text{Merjeno} \qquad \qquad \text{Znane količine} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \\ \Delta\Phi_{mk,i}^q - \Delta\rho_{mk}^q - cdt_{mk} - \Delta N_{mk,i}^q \lambda_i \\ = \underbrace{\Delta\hat{T}_{mk}^q + \Delta\delta T_{mk}^q + \Delta\delta r_{mk}^{q,BE}}_{\text{nedisperzni}} - \underbrace{\Delta\hat{I}_{mk,i}^q - \Delta\delta I_{mk,i}^q}_{\text{dispersioni}} + \Delta\varepsilon_{mk,i}^q \end{array}$$

Vplivi na opazovanja:

Razlike popravkov se lahko prenašajo za vsako nosilno valovanje posebej (v obliki  $\delta\Delta\Phi_{mk,1}^q$  in  $\delta\Delta\Phi_{mk,2}^q$ ), lahko pa se tvorita geometrije prosta in ionosfere prosta linearna kombinacija popravkov faznih razlik za nosilni valovanji L1 in L2

$$\delta\Delta\Phi_{mk}^{q,disp} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \delta\Delta\Phi_{mk,1}^q - \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \delta\Delta\Phi_{mk,2}^q,$$

$$\delta\Delta\Phi_{mk}^{q,non-disp} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \delta\Delta\Phi_{mk,1}^q - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \delta\Delta\Phi_{mk,2}^q.$$

Premični sprejemnik lahko disperzne in nedisperzne popravke za vse pomožne postaje uporabi v neposredni interpolaciji za svoj položaj (podobno kot pri konceptu FKP) ter nato v postopku določitve baznega vektorja z ene referenčne postaje, ali pa rekonstruira originalne razlike popravkov.

Razdelitev popravkov na disperzne in nedisperzne omogoča tudi optimizacijo količine podatkov za prenos od omrežja do premičnega sprejemnika. V splošnem se geometrijski del spreminja počasneje, vpliv ionosfere pa izkazuje večjo dinamiko, kar je še posebej izrazito v času povečane Sončeve aktivnosti. Zato se disperzni popravki pošiljajo s krajšim (1 s ali 2 s), nedisperzni pa lahko s primerno

daljšim intervalom (5 s ali 10 s). Tako se še dodatno zmanjša potrebna pasovna širina za prenos mrežnih popravkov. Čeprav za pošiljanje nedisperznih popravkov zadošča že interval 30 s, pa logistično to ni primerna odločitev, saj tako dolg interval vpliva na daljši čas do začetka merjenja s premičnim sprejemnikom, saj ta ne more začeti z meritvijo, dokler ne sprejme vseh popravkov RTK (Euler, Zebhauser, 2003).

Mrežna sporočila MAC vsebujejo še koordinate glavne in pomožnih postaj. V prid manjši količini potrebnih podatkov za prenos se tudi koordinate pomožnih postaj prenašajo kot razlike koordinat glede na glavno referenčno postajo.

Skladno s standardom RTCM 3.1 mora omrežje pošiljati razlike popravkov (sporočila 1015 in 1016) ter razlike koordinat med pomožnimi in glavno postajo (sporočilo 1014) z intervalom največ 15 s (RTCM 10403.1:2009).

Premični sprejemnik iz koordinat glavne postaje, razlik koordinat pomožnih postaj, originalnih opazovanj faze nosilnega valovanja (ali popravkov) glavne postaje in razlik popravkov pomožnih postaj rekonstruira originalna opazovanja vseh referenčnih postaj. Za določitev svojega natančnega položaja lahko nato uporabi poljubno strategijo, na primer uporabi opazovanja vseh (ali dela) referenčnih postaj, ali pa uporabi opazovanja le ene izbrane referenčne postaje iz okolice ter uporabi klasičen pristop z dvojnimi faznimi razlikami, pri tem pa lahko uporabi tudi opazovanja satelitov, ki niso fazno določena v omrežju (Euler in sod., 2001). Vse referenčne postaje v omrežju GNSS so na istem nivoju fazne nedoločenosti, kar pomeni, da za celotno omrežje velja en skupen nabor začetnih vrednosti celih valov (samo po ena fazna nedoločenost za vsak satelit). Zato premični sprejemnik lahko kadar koli preide na drugo glavno postajo (in njene pripadajoče pomožne postaje), na primer ob izpadu referenčne postaje ali ob velikih premikih premičnega sprejemnika GNSS, brez da bi moral inicializirati svoje filtre<sup>8</sup> (Euler, Zebhauser, 2003).

Kljub temu, da je bil koncept MAC zastavljen tako, da omogoča način z enosmerno komunikacijo (ang. Broadcast), pa danes tako zaradi razširjenosti in dostopnosti dvosmerne komunikacije (ang. Two-way) kot tudi optimalne izbire glavne in pomožnih referenčnih postaj prevladuje slednji.

### 2.3.4 Delovanje omrežja po konceptu Master-Auxiliary

Da je bilo mogoče koncept standardizirati, je bilo treba obdelavo na osrednjem računalniku v omrežju razdeliti na naslednje korake (Brown in sod., 2006):

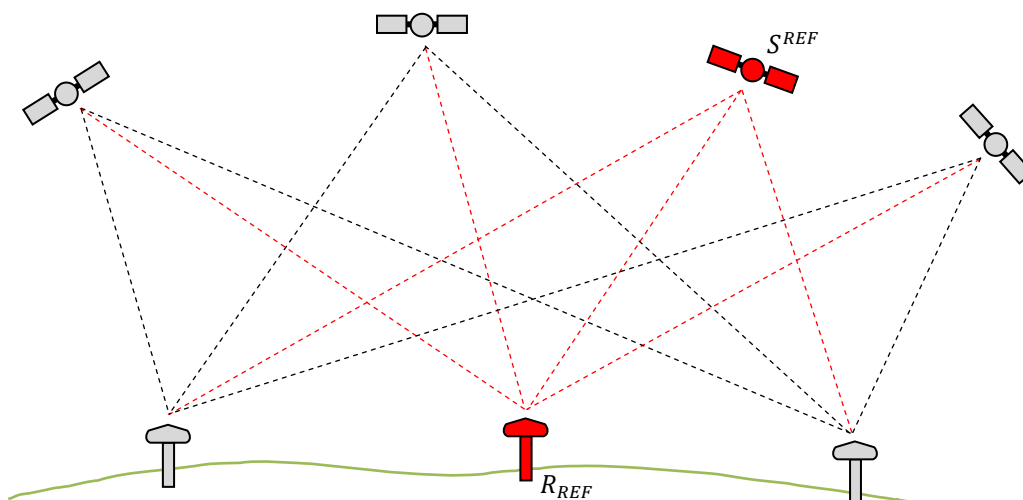
1. Poleg opazovanj kode in faze nosilnih valovanj z referenčnih postaj se v osrednjem računalniku omrežja zbirajo tudi podporni podatki, kot na primer najhitrejše precizne efemeride, podatki o stanju ionosfere in podatki o kodnih zamikih. Predhodna obdelava surovih opazovanj vključuje odkrivanje prekinitev signalov, vključitev troposferskega modela, kontrolo kodnih in faznih psevdorazdalj, odkrivanje grobih pogreškov v koordinatah referenčnih postaj ter izračun orbit (preciznih za potrebe mrežne analize in oddanih za potrebe priprave popravkov RTK, ki se pošiljajo premičnim sprejemnikom). Za odkrivanje prekinitev se uporabljajo časovne razlike (ang.

---

<sup>8</sup> Premični sprejemnik ocenjuje svoj položaj (lahko tudi druge neznanke) s Kalmanovim filtrom. Filter vso zgodovino izračunov hrani v sistemski matriki, ki jo obnavlja z vsakim novim opazovanjem. Pri prehodu na drugo glavno referenčno postajo ali celo drugo celico (če je le-ta na istem nivoju fazne nedoločenosti), sprejemniku ni treba zavreči informacije, ki jo že hrani v svoji sistemski matriki, ampak le doda nova opazovanja v sistem. Tako prihrani čas, potreben za konvergirane rešitve. Kalmanov filter je na kratko opisan v poglavju *Kalmanov filter*.

Time Differencing) geometrije prostih linearnih kombinacij, kot sekundarna metoda pa še linearna kombinacija  $13\varphi_1 + 10\varphi_2$ . Troposferski model se uporablja le v postopku določitve fazne nedoločenosti v omrežju, ne pa tudi v pripravi popravkov RTK, ki se pošiljajo premičnim sprejemnikom GNSS.

2. Najprej se določijo realno-številčne fazne nedoločenosti za vse postaje v omrežju. Pri tem se uporabljajo nediferencirana opazovanja faze in opazovanja kode signala GNSS. Z obsežnim Kalmanovim filtrom se oceni vse ključne vplive na opazovanja – deterministične vplive ionosfere in troposfere, parametre satelitovih in sprejemnikovih ur ter aktivnost ionosfere. Da se vplivi ionosfere in satelitskih orbit modelirajo kar najbolj točno, se uporablja stohastično modeliranje. Odpravijo se tudi vplivi prekinitev signalov.
3. Fazne psevdorazdalje vseh referenčnih postaj se reducirajo na skupni nivo fazne nedoločenosti. Problem obdelave nediferenciranih opazovanj je običajno v prevelikem vektorju neznan, ki jih je treba določiti, oziroma v premajhnem številu opazovanj, s pomočjo katerih bi se lahko ta vektor neznan določil. Zato se uporabijo dodatne vezi. Leica GNSS Spider to težavo zaobide tako, da določi fazno nedoločenost za eno referenčno postajo (za vse satelite) in en satelit (za vse postaje). Tako se število neznan zmanjša na obvladljivo vrednost. Ostale fazne nedoločenosti se določijo z metodo LAMBDA. Omenjene vezi določajo skupni nivo fazne nedoločenosti v omrežju.



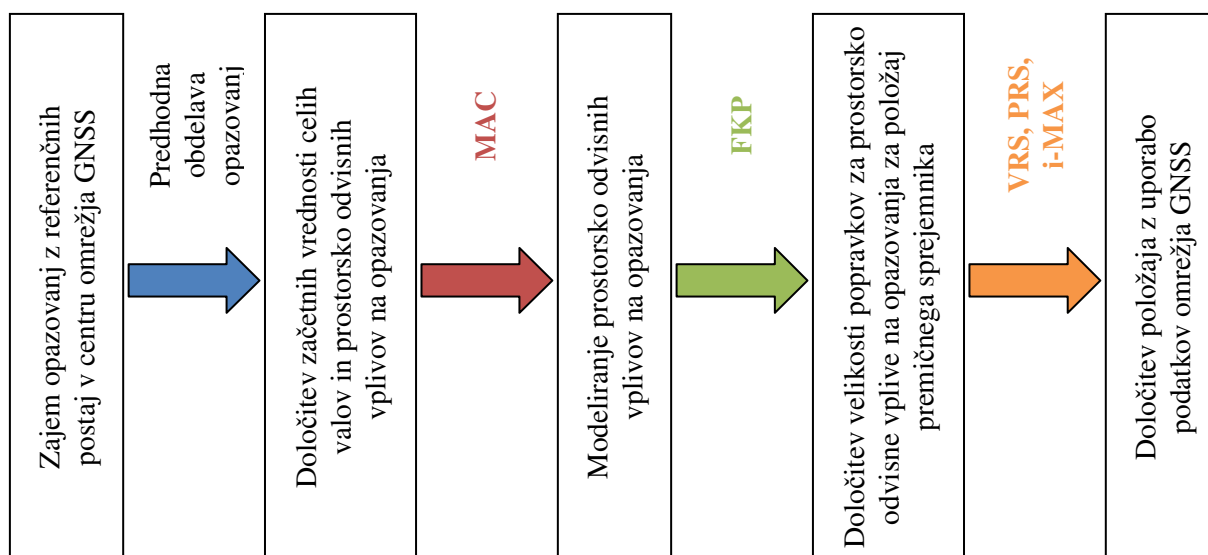
Slika 19: Izbira ene referenčne postaje in enega referenčnega satelita, za katera se določijo vse fazne nedoločenosti, predstavlja osnovo za zmanjšanje števila neznan v modelu z nediferenciranimi opazovanji.

Figure 19: When zero difference processing is used it is necessary to constrain the ambiguities for one station (all satellites) and one satellite (all stations).

4. Z dvosmerno komunikacijo programska oprema v centru omrežja poskrbi za optimalno izbiro podmnožice referenčnih postaj (celico) za pripravo mrežnih popravkov in hkratno minimiziranje potrebne pasovne širine za prenos.
5. Mrežni popravki MAC se pripravijo za izbrano glavno in pomožne referenčne postaje. Opazovanja faze so reducirana samo za ocenjeno mrežno fazno nedoločenost, pogrešek ure sprejemnikov in znanih količin (geometrijska razdalja satelit-sprejemnik ter pogrešek satelitove ure) ter zato niso obremenjena s proizvajalca lastnimi modeli vplivov na opazovanja. Za zmanjšanje potrebne pasovne širine za prenos popravkov RTK je ena od referenčnih postaj izbrana za glavno, za katero se prenašajo celotna opazovanja. Za pomožne postaje pa se prenašajo samo razlike popravkov glede na glavno postajo. Navadno je za glavno postajo izbrana referenčna

postaja, ki je najbližje premičnemu sprejemniku, čeprav oddaljenost glavne referenčne postaje ne vpliva na natančnost interpolacije prostorsko odvisnih vplivov na opazovanja. Takšna izbira glavne postaje ima dodatno praktično vrednosti, saj v primeru izpada mrežnih popravkov premični sprejemnik brez prekinitev lahko določi svojo položaj s klasičnim pristopom z eno (najbližjo) referenčno postajo.

6. Mrežni popravki se (običajno preko širokopasovnih komunikacijskih poti) prenesejo do premičnega sprejemnika.
7. Premični sprejemnik uporabi podatke o disperznih in nedisperznih vplivih na opazovanja za glavno in pomožne postaje ter z interpolacijo določi velikost vplivov za svoj položaj. Ker so vse razlike popravkov na skupnem nivoju fazne nedoločenosti, lahko premični sprejemnik interpolira vplive za svoj položaj v trenutku, ko sprejme vse podatke iz omrežja, brez čakanja, da njegovi modeli skonvergirajo, za razliko od osrednje mrežne programske opreme, ki mora določiti fazne nedoločenosti za celotno omrežje.
8. Premični sprejemnik z upoštevanjem lokaliziranih vplivov na opazovanja oceni neznano začetno število celih valov in določi svoj položaj. Kakovost določitve položaja je neobhodno povezana z natančnim poznavanjem predhodnih korakov.



Slika 20: Shematski prikaz korakov v omrežju GNSS: od zajema podatkov referenčnih postaj do določitve položaja z uporabo vseh podatkov omrežja – mrežne rešitve. Stopnja obdelave opazovanj v centru omrežja predstavlja ločnico med posameznimi mrežnimi koncepti (Wanninger, 2008).

Figure 20: Calculation flow in GNSS networks: from data input to rover position solution. Different network approaches differ with respect to allocation of the processing steps either to the network processing centre or to the rover (Wanninger, 2008).

### 2.3.5 Popravki MAC na premičnem sprejemniku

Ko premični sprejemnik prejme popravke RTK za glavno referenčno postajo in vse pomožne postaje, mora določiti velikost popravkov za svoj položaj. Po konceptu MAC so popravki določeni kot enojne fazne razlike med glavno in posameznimi pomožnimi referenčnimi postajami, popravljene za geometrično razdaljo, pogrešek sprejemnikove ure in začetno število celih valov, tako da predstavljajo prostorsko odvisne vplive na opazovanja vzdolž posameznega baznega vektorja med glavno in pomožnimi postajami (Geisler, 2006).



Z naraščajočo dolžino baznega vektorja so tudi prostorsko odvisni vplivi čedalje bolj dekorelirani, zato premični sprejemnik GNSS ne more več zanesljivo modelirati vplivov samo z uporabo opazovanj ene referenčne postaje. Če pa uporabi vse podatke iz omrežja (glavna in pomožne postaje), lahko z interpolacijo določi vplive za svoj položaj. Vhodni parametri za interpolacijo so torej enojne fazne razlike med glavno in posameznimi pomožnimi postajami ter koordinate vseh postaj.

Premični sprejemnik modelira popravke za kateri koli položaj  $p$  v omrežju z aproksimacijsko funkcijo  $F$  za disperzni popravek ter  $G$  za ne-disperzni popravek

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp} = F(\varphi_{mp}, \lambda_{mp}, h_{mp} \dots)$$

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp} = G(\varphi_{mp}, \lambda_{mp}, h_{mp} \dots),$$

pri čemer je  $(\varphi_{mp}, \lambda_{mp}, h_{mp})$  relativni položaj premičnega sprejemnika glede na glavno postajo.

Pripadajoče popravke za nosilni valovanje L1 in L2 se nadalje sestavi z enačbama

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,1}^q = \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp} + \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp},$$

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,2}^q = \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp} + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp}.$$

Enojne fazne razlike opazovanj popravljene za prostorsko odvisne vplive na točki  $p$  se za posamezno nosilno valovanje  $i$  izračuna iz

$$\Delta\tilde{\Phi}_{mp,i}^q = \Delta\Phi_{mp,i}^q + \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,i}^q.$$

Tako popravljena opazovanja se lahko neposredno uporabijo za določitev natančnega položaja premičnega sprejemnika z enojnimi ali dvojnimi faznimi razlikami (Takac, Zelzer, 2008). Algoritmi za modeliranje prostorskih vplivov na opazovanja (funkciji  $F$  in  $G$ ) ter postopek obdelave opazovanj in popravkov mreže v premičnem sprejemniku GNSS so navadno proizvajalcu lastni.

V opazovanjih in popravkih pa so vedno skriti še preostali vplivi (vrednosti  $\delta$  na sliki 16). V primeru opazovanj z ene referenčne postaje preostali vplivi naraščajo z dolžino baznega vektorja, v primeru mrežnih popravkov pa so preostali pogreški rezultat nepopolnega modeliranja vplivov na opazovanja (nepopolna interpolacija, saj interpolacijska funkcija ne more v popolnosti opisati dejanskega obnašanja v atmosferi in orbiti). S postopki tvorjenja linearnih kombinacij opazovanj se lahko uspešno odstranijo tudi preostali vplivi. Tako se lahko s tvorjenjem linearne kombinacije L3 odstrani vpliv ionsferske refrakcije, vendar pa se hkrati poveča šum meritve (standardna deviacija kombinacije L3 je približno trikrat večja od L1). Pri tradicionalni izmeri RTK je izbira linearne kombinacije L3 pogojena z dolžino baznega vektorja (mejo proizvajalci določijo empirično, običajno se prehod iz L1+L2 na L3 zgodi pri dolžini baznega vektorja 8 km). V primeru omrežja GNSS pa se od razdalje odvisni vplivi na opazovanja skušajo oceniti, saj dolžina baznega vektorja ni več reprezentativna za ocenitev preostalih pogreškov. Pri VRS na primer dolžina baznega vektorja znaša vsega nekaj metrov in v takšni situaciji sprejemnik sploh ne pričakuje preostalih pogreškov. Če je v omrežju GNSS vgrajene dovolj nadštevilnosti (večje število referenčnih postaj, kot je minimalno potrebno, ter krajše razdalje med referenčnimi postajami), programski algoritem v centru lahko oceni tudi kakovost mrežnih popravkov, to je oceni velikost preostalih vplivov na opazovanja. Natančnost izračunanih

poprakov je večja, če se modeli za aproksimiranje vplivov na opazovanja skladajo s prostorsko obliko dejanskih vplivov. Informacijo o natančnosti popravkov premični sprejemnik GNSS uporabi za določitev uteži opazovanj ter izbiro najboljše linearne kombinacije opazovanj L1 in L2, za modeliranje preostalih pogreškov ionosfere pa uporabi stohastične modele (Takac, Lienhart, 2008).

Geislerjeva (2006) je preučevala vpliv izbire različnih interpolacij, in sicer:

- na razdalji temelječo linearno interpolacijo,
- ploskovne modele nizkih redov, pri čemer za modeliranje vplivov ionosfere zadostuje 2D ploskev, za modeliranje vplivov troposfere pa so le v primeru velikih višinskih razlik med referenčnimi postajami potrebne 3D regresijske ploskve ter
- kolokacijo po metodi najmanjših kvadratov.

Na testnih in realnih omrežjih je ugotovila, da na razdalji temelječa linearna interpolacija daje najslabše rezultate, saj modelira vplive le v eni dimenziji. Linearna interpolacija izhaja iz dejstva, da referenčne postaje, ki so bližje, bolj verno predstavljajo lokalne vplive na opazovanja za položaj premičnega sprejemnika. Na razdalji temelječa linearna interpolacija torej za utež uporablja recipročno vrednost razdalje med referenčno postajo in premičnim sprejemnikom. Razlika popravkov  $CD$  za položaj premičnega sprejemnika  $p$ , ki prejema popravke iz  $n$  referenčnih postaj, pri čemer 1 predstavlja glavno, 2 do  $n$  pa pomožne referenčne postaje, se interpolira po enačbi

$$CD_p = \frac{\sum_{i=2}^n CD_i/S_i}{\sum_{i=1}^n 1/S_i},$$

pri čemer sta

$S_i$  razdalja med referenčno postajo  $i$  in premičnim sprejemnikom  $p$ ,

$CD_i$  pa razlika popravkov z referenčne postaje  $i$ .

V števcu interpolacijske enačbe nastopa vsota samo preko vseh pomožnih postaj. Ker so razlike popravkov za glavno postajo nič, je treba upoštevati samo njeno utež v imenovalcu (Euler, Zebhauser, 2003).

V primeru, da so bili atmosferski vplivi v omrežju majhni, so vsi načini interpolacije izkazovali približno enake značilnosti in zmogljivosti. V primerjavi z metodo izmere z eno referenčno postajo so odstranili od 9% do 69% preostalih vplivov. Še večji delež je bil dosežen v primeru visoke ionosferske aktivnosti, kjer so odstranili od 24% do 78% vplivov, pri tem pa je najboljše rezultate dajala kolokacija po metodi najmanjših kvadratov. Ta metoda daje najboljše rezultate tudi v primeru, da je v celici uporabljeno večje število pomožnih postaj. Interpolacija z 2D regresijskimi ploskvami pa daje boljše rezultate, če je oblika celice pravilna (okrogla) in so postaje enakomerno razporejene okoli premičnega sprejemnika. Zato mora biti posebna pozornost na strani upravljavca omrežja namenjena pazljivemu načrtovanju omrežja, na strani programske opreme za upravljanje omrežij pa posvečena izbiri referenčnih postaj in oblikovanju celice (Geisler, 2006).

### 2.3.6 Primerjava konceptov

Koncepti VRS, PRS in i-MAX vsi predstavljajo variacijo iste zamisli, zato so skupaj kategorizirani kot ne-fizične referenčne postaje. V vseh primerih mrežna programska oprema določi velikost disperznih in nedisperznih popravkov, optimiziranih za položaj premičnega sprejemnika. Tako individualizirani

popravki skupaj z originalnimi opazovanji fizične referenčne postaje tvorijo navidezna opazovanja, ki se posredujejo preničnemu sprejemniku.

V primeru konceptov VRS in PRS je fizična referenčna postaja tudi premaknjena, tako da se navidezna opazovanja nanašajo na ne-fizično točko, ki se navadno nahaja v bližini približnega položaja preničnega sprejemnika (od tod tudi imeni konceptov – virtualna oziroma psevdo-referenčna postaja). Dolžina baznega vektorja v primeru VRS navadno znaša nekaj metrov. Koncept PRS je bil razvit kot zgodnja rešitev problema preoptimistične ocene kakovosti navidezne referenčne postaje zaradi zelo kratkega baznega vektorja. V primeru PRS je bazni vektor namenoma dolg nekaj kilometrov.

Med VRS in i-MAX pa obstaja še ena pomembna razlika v primeru premikajočega se preničnega sprejemnika. V primeru VRS položaj navidezne referenčne postaje ostane isti ves čas trajanja povezave RTK, ki je tako optimiziran le za začetni položaj preničnega sprejemnika. V primeru i-MAX pa se interpolacija vplivov za položaj preničnega sprejemnika ves čas posodablja in je zato optimalna tudi pri večjih (na primer več kilometrskih) premikih preničnega sprejemnika.

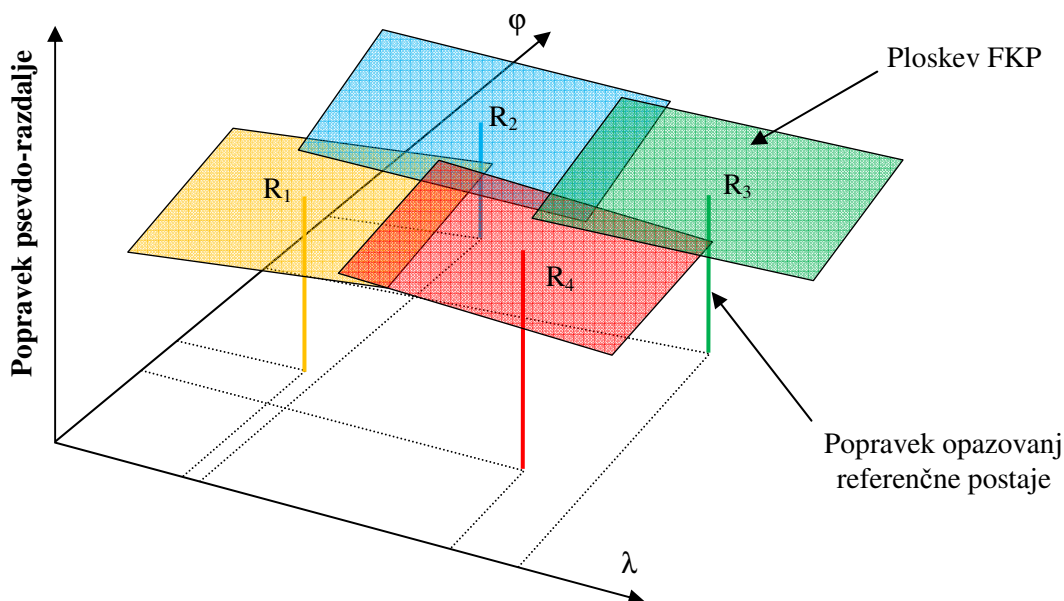
Koncept FKP je po osnovni zamisli še najbližje konceptu MAC. Tudi pri FKP se preničnemu sprejemniku ločeno posredujejo surova opazovanja fizične referenčne postaje ter mrežni popravki. Vplivi na opazovanja so predstavljeni s koeficienti prostorskih ploskev, ki se nanašajo na določeno referenčno postajo. V obeh primerih preični sprejemnik sam izbere način uporabe mrežnih popravkov za določitev svojega natančnega položaja.

### **FKP**

Ideja koncepta FKP je, da se v enem obsežnem vektorju stanj<sup>9</sup> modelirajo vsi vplivi na opazovanja, za razliko od konceptov v prostoru opazovanj, kjer so vsi vplivi predstavljeni z eno samo vrednostjo, ki predstavlja vsoto vseh vplivov. Avtorji koncepta izpostavljajo možnosti, da se za modeliranje posameznega vpliva lahko uporabljajo različna opazovanja in ne samo opazovanja do satelitov. Za modeliranje vplivov troposferske refrakcije se dodatno lahko uporabijo radiometri za določitev količine vodne pare in podobno. Za interpolacijo posameznih neznank iz vektorja stanj se lahko uporabi celotno znanje o dejanskem obnašanju konkretne neznanke, tako je na primer model za določitev vpliva orbite popolnoma determinističen, po drugi strani pa je interpolacija vpliva troposferske refrakcije bistveno bolj kompleksna in variira s časom. Nasprotno je pri konceptih v prostoru opazovanj treba interpolirati skupen vpliv, pri čemer so učinkovite samo polinomske funkcije ali stohastična interpolacija. Predstavitev vplivov na opazovanja z izvorom v satelitu in zgornji atmosferi se v prostoru stanj nič več ne nanašajo na posamezno referenčno postajo ali skupino postaj. Omrežje GNSS, ki deluje v prostoru stanj, je tudi bistveno manj občutljivo na izpade posameznih referenčnih postaj, poleg tega pa so zaradi večje nadštevilnosti razdalje med referenčnimi postajami lahko večje. Za optimizacijo pasovne širine je dodatno mogoče posamezne komponente vektorja stanj pošiljati z različnimi intervali (Wübbena in sod., 2001a).

---

<sup>9</sup> Vektor stanj, kjer so posamezne komponente zapisane kot podvektorji, je zelo kompleksen in lasten proizvajalcu mrežne programske opreme. Poenostavljeno se vektor stanja lahko zapiše kot  $\vec{x} = \langle \vec{X}_i, \vec{N}_i^k, \delta \vec{t}_i, \delta \vec{t}_i^k, \delta \vec{o}^k, \delta \vec{T}_i^k, \delta \vec{I}_{s,i}^k, \delta \vec{M}_{s,i}^k \rangle$ , kjer komponente po vrsti pomenijo vektor položajev referenčnih postaj, vektor faznih nedoločenosti, urinih stanj sprejemnikov in satelitov, parametre orbit ter vektorje vplivov troposfere, ionosfere in večpotja.



Slika 21: Mrežni popravki so po konceptu FKP predstavljeni s koeficienti prostorskih ploskev.

Figure 21: Linear FKP planes are represented by area correction parameters.

Za potrebe pošiljanja popravkov RTK se vektor neznank iz prostora stanj prevede v prostor opazovanj. Celovito in natančno opisan vektor v prostoru stanj bo v prihodnosti sicer omogočil, da bo prečni sprejemnik iz opazovanj lahko izločil pripadajoče vplive na opazovanja in določil točen absolutni položaj samo iz svojih opazovanj do satelitov GNSS. Vendar danes ni na voljo sprejemnika, ki bi znal neposredno uporabiti vektor stanja. Aktualni instrumenti uporabljajo popravke v prostoru opazovanj, zato programska oprema omogoča pretvorbo vektorja stanj v različne predstavitve, ena od njih so ploskovni parametri FKP. Koncept FKP je realiziran s programsko opremo Geo++ GNSMART (GNSS State Monitoring and Representation Technique).

Wübbena (2001a) je pokazal, da v večini primerov zadošča predstavitev vplivov na opazovanja z linearnimi ploskovnimi parametri (ravninami). Ploskev je centrirana na mesto fizične referenčne postaje, parametri FKP pa predstavljajo horizontalne gradiente za geometrične in ionosferske vplive v prostoru opazovanj, kot to prikazuje slika 21. Izračunajo se iz preostalih razlik med referenčnimi postajami GNSS, torej tistega dela pogreškov, ki se ga s tvorjenjem faznih razlik ne da odstraniti. Glede na dejanske karakteristike posameznega vpliva na opazovanja pa se lahko za opis ploskve uporabijo tudi polinomi višjih stopenj.

Ploskovni parametri omogočajo določitev popravkov za približni položaj prečni sprejemnika  $p$  po enačbi

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^q = f(FKP_{mp}^q, \Delta\varphi_{mp}, \Delta\lambda_{mp}, \Delta h_{mp}),$$

pri čemer je  $m$  najbližja referenčna postaja.

Linearni model FKP za disperzne in nedisperzne vplive za položaj prečni sprejemnika GNSS  $p$  je določen z enačbami (Wübbena, Bagge, 2006)

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp} = 6.37 \cdot H \cdot [n^{q,disp} \Delta\varphi_{mp} + e^{q,disp} \Delta\lambda_{mp} \cdot \cos(\varphi_m)],$$

$$H = 1 + 16 \left( 0.53 - \frac{E_p^q}{\pi} \right)^3,$$

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp} = 6.37 \cdot [n^{q,non-disp}\Delta\varphi_{mp} + e^{q,non-disp}\Delta\lambda_{mp} \cdot \cos(\varphi_m)],$$

pri čemer so

$n^{q,disp}$ ,  $e^{q,disp}$  disperzna gradienta FKP v smeri sever-jug ter v smeri vzhod-zahod,

$n^{q,non-disp}$ ,  $e^{q,non-disp}$  nedisperzna gradienta FKP v smeri sever-jug ter v smeri vzhod-zahod,

$\Delta\varphi_{mp} = \varphi_p - \varphi_m$ ,  $\Delta\lambda_{mp} = \lambda_p - \lambda_m$  razliki položajev preničnega  $p$  in referenčnega sprejemnika  $m$ ,

$E_p^q$  pa je višinski kot satelita  $q$  za položaj preničnega sprejemnika  $p$ .

Pripadajoče popravke za nosilni valovanji L1 in L2 se nadalje zapiše z enačbama

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,1}^q = \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp} + \frac{f_2}{f_1} \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp},$$

$$\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,2}^q = \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp} + \frac{f_1}{f_2} \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp}.$$

Glede na zapise nedisperznih popravkov v primeru FKP in MAC je razvidno, da za nedisperzni linearni model FKP ni vključena odvisnost od višine, za razliko od popravkov MAC, pri katerih je vsebovan celoten vpliv troposfere, ki vključuje tudi vpliv višinske razlike med referenčnimi postajami.

Relacijo med nedisperznimi popravki, pridobljenimi po konceptu FKP in MAC, se poveže z ocenjenim vplivom troposferske refrakcije, ki se ga lahko določi z a-priori modelom (na primer modificiranim Hopfieldovim modelom) in parametri standardne atmosfere

$$[\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp}]_{FKP} = [\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,non-disp}]_{MAC} + \tilde{T}_{mp}.$$

Relacijo med disperznimi popravki pa predstavlja kvocient frekvenc nosilnih valovanj

$$[\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp}]_{FKP} = \frac{f_1}{f_2} \cdot [\delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp}^{q,disp}]_{MAC}.$$

Takac in Zelzer (2008) sta tako pokazala, da je mogoče realizirati predstavitev mrežnih popravkov s ploskvami FKP, obratno pa ne velja, saj parametri FKP ne vsebujejo podatka o uporabljenem troposferskem modelu.

Iz ploskovnih parametrov FKP se lahko preprosto izračuna tudi navidezna referenčna postaja VRS, saj tok podatkov vsebuje vse potrebne informacije za izračun individualiziranih opazovanj za položaj preničnega sprejemnika. Ta izračun lahko opravi tudi prečni sprejemnik sam in tako ohrani prednosti enosmernega razpošiljanja popravkov FKP (Wübbena in sod., 2001a).

### VRS, i-MAX, PRS

Pri vseh treh individualiziranih mrežnih konceptih programska oprema v centru omrežja ustvari nefizična opazovanja referenčne postaje. V primeru i-MAX se pred oddajo interpolirani popravki za položaj premičnega sprejemnika prištejejo opazovanjem glavne referenčne postaje

$$\tilde{\Phi}_{m,i}^q = \Phi_{m,i}^q + \delta\Delta\tilde{\Phi}_{mp,i}^q,$$

kjer je

$\tilde{\Phi}_{m,i}^q$  opazovanje faze referenčne postaje  $m$  popravljeno za interpolirane vplive na opazovanja za položaj premičnega sprejemnika.

V primeru konceptov VRS in PRS se dodatno premakne tudi položaj referenčne postaje v bližino premičnega sprejemnika.

Nefizična opazovanja referenčne postaje za navidezno postajo  $v$  se lahko določijo z

$$\tilde{\Phi}_{v,i}^q = \tilde{\Phi}_{m,i}^q + \rho_{mv}^q + T_{mv} + A_{mv,i}^q,$$

kjer je

$\rho_{mv}^q + T_{mv} + A_{mv,i}^q$  geometrični premik iz fizične v navidezno referenčno postajo,

pri čemer so nadalje

$\rho_{mv}^q$  enojna fazna razlika geometričnih razdalj (razlika geometričnih razdalj med fizično in navidezno referenčno postajo),

$T_{mv}$  ocenjen vpliv troposferske refrakcije, ki se ga lahko določi z a-priori modelom in

$A_{mv,i}^q$  izračunan vpliv variacije faznega centra antene na mestu navidezne referenčne postaje.

Tudi v tem primeru je uporabljen troposferski model podvržen interpretaciji, zato je mogoč potencialni konflikt med modelom, ki ga uporablja mrežna programska oprema, in modelom, ki ga uporablja premični sprejemnik GNSS (Takac, Zelzer, 2008). Vplive uporabe nezdržljivih troposferskih modelov, ki se uporabljajo v mrežni programski opremi in na premičnem sprejemniku v primerih VRS in FKP je preučeval že Landau (2003).

V primeru VRS mrežna programska oprema ustvari opazovanja, ki so optimalna za položaj navidezne referenčne postaje v bližini premičnega sprejemnika. Glede na oddaljenost od najbližje fizične referenčne postaje je treba vzeti v obzir tudi drugačne višinske kote, azimute in geometrične razdalje do satelitov, kot jih zazna premični sprejemnik. Premični sprejemnik in referenčna postaja sta lahko tudi na zelo različnih nadmorskih višinah. Zato je treba poleg geometričnega premika upoštevati tudi različne velikosti vplivov troposfere med referenčnimi postajami in navidezno postajo.

Geometrična razdalja, ki jo opazuje premični sprejemnik, se popravi po zvezi

$$\rho_p^q = \rho_m^q + \rho_{mv}^q + T_v^q - T_m^q,$$

pri čemer sta

$\rho_{mv}^q$  razlika geometričnih razdalj med referenčno postajo in navidezno postajo od satelita  $s$ ,

$T$  pa ocenjen vpliv troposfere za satelit  $q$  na mestu navidezne  $v$  in fizične postaje  $m$ , kot izhaja iz uporabljenega troposferskega modela sistema VRS.

Če premični sprejemnik GNSS uporablja drugačen troposferski model kot programska oprema v centru omrežja GNSS, zazna drugačno razdaljo od satelita (Landau in sod., 2003)

$$\delta T = T_p^{VRS} - T_v^{VRS} - (T_p^{Rover} - T_v^{Rover}),$$

kjer sta

$T^{VRS}$  vpliva troposfere, izračunana iz modelov, uporabljenih v programski opremi sistema VRS, in

$T^{Rover}$  vpliva troposfere, izračunana iz modelov, vgrajenih v premični sprejemnik.

Ker je v primeru VRS uporabljen enak troposferski model pri obdelavi celotne mreže in pri ustvarjanju popravkov VRS, je prvi del vpliva zanemarljiv. Šele pri velikih višinskih razlikah (900 m) ta vpliv doseže 14 mm. Osrednja programska oprema izračunava vpliv troposfere med referenčno postajo in navidezno referenčno postajo, premični sprejemnik pa vpliv troposfere med navidezno postajo in svojim položajem. Landau (2003) je pokazal, da vpliv uporabe različnih troposferskih modelov pri višinskih razlikah do 100 m med navidezno postajo in premičnim sprejemnikom prispeva manj kot 1 mm pogreška. Položaj navidezne referenčne postaje je namreč le približen položaj premičnega sprejemnika, vendar največji del pogreška zaradi uporabljenih različnih modelov troposfere prispeva višinska razlika med navidezno postajo in premičnim sprejemnikom, vpliv različnega položaja pa je še bistveno manjši. V primeru FKP pa je ta vpliv bistveno večji (do 68 mm), saj vpliv troposfere iz ploskovnih parametrov določi premični sprejemnik brez poznavanja uporabljenih modelov v osrednji programski opremi sistema FKP.

Wübbena (2001) pa izpostavlja drug vidik istega problema. Po definiciji RTCM opazovanja referenčnih postaj ne smejo biti popravljena za vplive troposfere v izogib problemom uporabe nezdržljivih modelov med referenčnim in premičnim sprejemnikom, pri čemer premični sprejemnik izračuna vpliv troposfere za obe strani. Za to pa mora poznati koordinate (fizične) referenčne postaje. Ker v primeru VRS pozna le koordinate navidezne postaje, ne more izračunati vpliva troposfere za fizično, ampak le za navidezno postajo. Posledica tega je, da mora omrežna programska oprema vračunati vpliv troposfere med fizično in navidezno referenčno postajo in s tem spet vnaša potencialno nevarnost uporabe različnih modelov.

Geometrični premik referenčne postaje v primeru VRS in PRS ne vsebuje dodane vrednosti v smislu mrežnih popravkov, kar pomeni, da kakovost ne-fizičnih opazovanj fizične referenčne postaje ni v nobenem vidiku izboljšana zaradi dodatnega geometrijskega premika. Nasprotno – tudi algoritmi in uporabljeni modeli za določitev geometričnega premika so proizvajalcu lastni. Razlog za geometrijski premik v navidezno referenčno postajo leži v fazi zgodnjega razvoja omrežnih konceptov, ko sprejemniki še niso omogočali obdelave mrežnih popravkov RTK. Popravljen opazovanja so zato neposredno uporabili v tradicionalnem postopku določitve položaja z eno referenčno postajo. V tem postopku se navadno uporablja dolžina baznega vektorja kot merilo za izbiro optimalne kombinacije

opazovanj. Ker pa so stohastične lastnosti nefizičnih opazovanj z vključenimi popravki iz omrežja spremenjene, dolžina baznega vektorja do fizične referenčne postaje ne more biti več uporabna kot zanesljiva ocena za preostale vplive na opazovanja. Geometrični premik fizične referenčne postaje je bil tako uporabljen zato, da je posnemal lastnosti vplivov nefizičnih opazovanj (Takac, Zelzer, 2008).

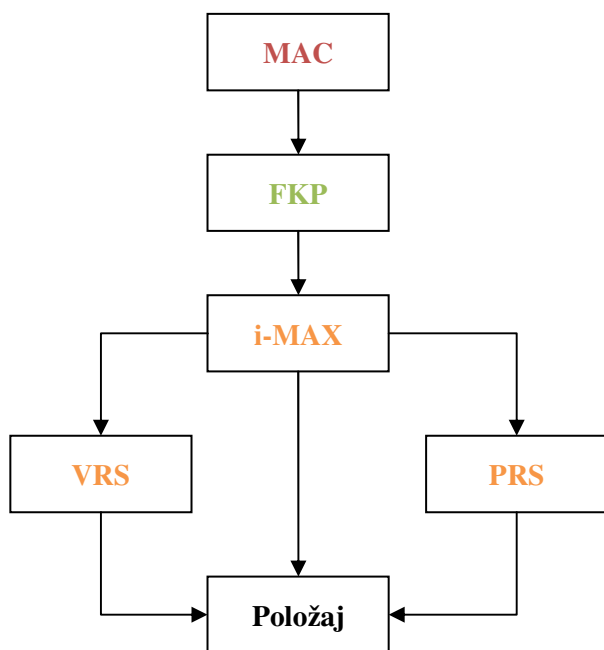
Zaradi nepopolnega modeliranja vplivov na opazovanja v primeru VRS niti kratka dolžina baznega vektorja ni dovolj reprezentativna za oceno preostalih vplivov na nefizična opazovanja. Položaj navidezne postaje PRS, ki se navadno nahaja nekaj kilometrov od položaja premičnega sprejemnika, naj bi omogočal bolj verno predstavitev preostalih vplivov kot funkcije dolžine baznega vektorja. Vendar pa tudi izbira položaja PRS odraža zgolj najboljšo predpostavko algoritmov, ki jih uporablja premični sprejemnik.

Sodobni zapisi za prenos mrežnih popravkov RTK, kakršen je RTCM 3.1, vključujejo tako sporočila o izhodiščni fizični referenčni postaji kot tudi oceno velikosti preostalih vplivov na opazovanja (to je pogreškov modela) (RTCM 10403.1:2009). S pomočjo teh podatkov premični sprejemnik lahko bolj zanesljivo oceni kakovost ne-fizičnih opazovanj, kot bi to lahko določil zgolj iz dolžine navideznega baznega vektorja.

Landau (2003) zavrača očitke neprimernosti VRS v kinematičnih aplikacijah. Res je, da so popravki VRS optimalni za začetni položaj premičnega sprejemnika in v primeru, da se le-ta premakne za več kilometrov, ne odražajo več realnih vplivov na opazovanja. Vendar sporočila VRS (RTCM 2.3 sporočilo 59) vsebujejo tudi dodatne informacije (parametri podobni FKP, določeni za začetni položaj), ki naj bi premoščali te težave. Sicer pa uporabnik s preprosto prekinitvijo in ponovno vzpostavitev povezave RTK doseže, da se v centru omrežja na novo izračuna VRS, prilagojen za nov položaj premičnega sprejemnika (Janssen, 2009). Ta problem pa pri konceptu i-MAX sploh ni prisoten, saj se interpolacija popravkov psevdorazdalj ves čas prilagaja premičnemu sprejemniku in je zato vedno optimalna za njegov položaj.

Takac in Zelzer (2008a) sta pokazala, da se lahko iz standardiziranih popravkov MAC ustvari katera koli variacija FKP, i-MAX, VRS in PRS (slika 22). Nasprotno ne velja, saj v primeru nestandardnih konceptov ni znano, katere referenčne postaje in kakšni modeli so bili uporabljeni za ustvarjanje mrežnih popravkov.





Slika 22: Razmerja med različnimi mrežnimi koncepti.  
Figure 22: Relationship between MAC, FKP, i-MAX, VRS and PRS.

Pomembno je izpostaviti, da vsi individualizirani koncepti na strani osrednje programske opreme uporabljajo lastne modele in interpolacijske algoritme, zato uporabnik na terenu lahko doseže različne rezultate, če uporablja individualizirane popravke RTK po istem konceptu, vendar različnih proizvajalcev (Takac, Zelzer, 2008). Tudi Wübbena (2001a) navaja, da obstajajo razlike v splošnih zmogljivostih omrežij GNSS, kadar gre za enako predstavitev z navidezno referenčno postajo, vendar pridobljeno z različnimi mrežnimi koncepti, na primer navidezna postaja pridobljena iz prostora opazovanj (OSR-VRS) ali iz prostora stanj (SSR-VRS).

Več podatkov o mrežnem konceptu VRS je na voljo na primer v (Vollath in sod., 2000) in (Vollath in sod., 2002), več o konceptu FKP pa v (Wübbena in sod., 2001) in (Wübbena in sod., 2001a). Primerjave med koncepti so na voljo še v (Janssen, 2009) ter (Landau in sod., 2003).

## MAC

Argument posebne primernosti konceptov MAC in FKP, da omogočata delovanje omrežij tudi v oddajnem načinu, ne zdrži dejstva, da je že leta 2005 kar 99% vseh omrežij GNSS po svetu izkoriščalo dvosmerno komunikacijo za prenos popravkov RTK, v večini primerov širokopasovne tehnologije paketnega prenosa v mobilnih omrežjih. Dvosmerna komunikacija je s stališča upravljavca omrežja pravzaprav obvezna, saj omogoča kontrolo dostopov in zaračunavanje storitev, kar je osnova vseh ekonomskih vidikov omrežja (Trimble Terrasat, 2005).

Prav tako se navaja tudi procesna zahtevnost na strani prejemnega sprejemnika, ki je v nasprotju s pričakovanim trendom cenjenih sprejemnikov za masovno, negeodetsko uporabo (Janssen, 2009).

Kot slabosti koncepta MAC različni avtorji pogosto navajajo veliko pasovno širino, ki je potrebna za prenos popravkov glavne in pomožnih referenčnih postaj, še posebej v povezavi z novimi sateliti prihajajočih konstelacij Galileo in Compass ter novimi signali, na primer GPS L5. Narejene so bile številne teoretične primerjave potrebne pasovne širine v primeru VRS in MAC, na primer v (Brown in

sod., 2005) ter (Trimble Terrasat, 2005), vendar v primerjavah ni navedeno, kako so bile vrednosti dejansko izračunane. Zato je Janssen (2009) naredil teoretično in praktično primerjavo, ki je povzeta v preglednicah 6 in 7.

Osnova teoretične primerjave je bila dolžina posameznih sporočil, kot jih navaja standard RTCM 3.1 vključno z 48-bitnim prenosnim slojem (ang. Transport Layer), in sicer

$$BW_{VRS} = RTCM_{1004} \cdot r_{1004} + RTCM_{1006} \cdot r_{1006} + RTCM_{1008} \cdot r_{1008} + RTCM_{1030} \cdot r_{1030} + RTCM_{1032} \cdot r_{1032}$$

$$BW_{i-MAX} = RTCM_{1004} \cdot r_{1004} + RTCM_{1006} \cdot r_{1006} + RTCM_{1008} \cdot r_{1008} + RTCM_{1032} \cdot r_{1032}$$

$$BW_{MAX} = RTCM_{1004} \cdot r_{1004} + RTCM_{1006} \cdot r_{1006} + RTCM_{1008} \cdot r_{1008} + RTCM_{1014} \cdot r_{1014} + RTCM_{1017} \cdot r_{1017} \cdot n_{aux}$$

Pri tem je treba poudariti, da se število pomožnih postaj  $n_{aux}$  ne nanaša na sporočilo 1014, čeprav sporočilo vsebuje mrežne popravke za eno pomožno referenčno postajo. Zaradi optimizacije pasovne širine se pošiljajo popravki za posamezno pomožno postajo z intervalom ene postaje na sekundo.

Preglednica 6: Povprečne teoretične pasovne širine za tri mrežne koncepte. Povzeto po (Janssen, 2009).

Table 6: Average theoretical bandwidths of three Network RTK methods. Adapted from (Janssen, 2009).

Popravki	Število referenčnih postaj				
	3	6	9	12	15
VRS	1738 bps	1738 bps	1738 bps	1738 bps	1738 bps
i-MAX	1668 bps	1668 bps	1668 bps	1668 bps	1668 bps
MAC	3335 bps	5615 bps	7895 bps	10175 bps	12455 bps

Iz preglednice 6 je razvidno, da potrebna pasovna v primeru MAC močno narašča z velikostjo celice, medtem ko je v primeru VRS in i-MAX neodvisna, saj se informacije iz omrežja vgradijo v osnovni tok opazovanj z ene referenčne postaje. Pri izračunu je bil upoštevan 1 s interval pošiljanja sporočil 1004, 1014 in 1017, za druga sporočila pa 10 s ( $r_i=0.1$ ) ter 12 uporabljenih satelitov. Proizvajalcu lastna sporočila niso vključena v izračun, zato je potrebna pasovna širina v primeru VRS lahko večja.

Preglednica 7: Povprečne pasovne širine za tri mrežne koncepte izmerjene v omrežju CORSnet-NSW. Povzeto po (Janssen, 2009).

Table 7: Average bandwidths of three NRTK methods obtained from the CORSnet-NSW. Adapted from (Janssen, 2009).

Popravki	Število referenčnih postaj		
	3	6	9
VRS	1066 bps	1105 bps	1116 bps
i-MAX	1067 bps	1105 bps	1117 bps
MAC	2894 bps	4499 bps	6115 bps

Iz preglednice 7 je razvidno, da so empirično dobljene pasovne širine manjše od teoretičnih. Vzrok temu je optimizacija na strani programske opreme v centru omrežja, ki inteligentno določa potrebne intervale za pošiljanje posameznih popravkov, ki niso časovno kritični, v manjši meri pa tudi zaradi razlik v številu satelitov. Podatki so bili zbrani v omrežju CORSnet-NSW, Avstralija. Največje število uporabljenih referenčnih postaj je 9, saj v realnih razmerah oddaljene postaje ne prispevajo k mrežni rešitvi premičnega sprejemnika.

### 3 METODE

#### 3.1 Uvod

V sklopu magistrskega dela je bil v prostorih podjetja Geoservis, d.o.o. vzpostavljen lasten podatkovni center omrežja referenčnih postaj GNSS, ki je vključeval računalniško in komunikacijsko opremo ter programsko opremo za upravljanje omrežij GNSS. Izgrajeno omrežje je bilo topološko enako državnemu omrežju SIGNAL, tako da so storitve RTK med obema omrežjema primerljive.

Praktičen del je obsegal tudi izmero RTK-GNSS na treh testnih točkah za potrebe analize kakovosti določitve položaja v dveh različnih omrežjih GNSS pri uporabi različnih proizvajalcev RTK in različnih oddaljenostih od najbližje referenčne postaje ter izmero RTK-GNSS na eni testni točki za potrebe analize vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja.

Pri meritvah so bili uporabljeni 4 enaki premični sprejemniki GNSS, priključeni na isto anteno, tako da so bili zagotovljeni enaki merilni pogoji. Za dostop do storitev RTK omrežja SIGNAL so bile uporabljene 4 kartice SIM operaterja Mobitel z vključeno storitvijo DGPS.

#### 3.2 Podatki referenčnih postaj omrežja

Opazovanja GNSS so bila pridobljena za 26 stalno delujočih referenčnih postaj GNSS, ki so vključene v slovensko omrežje SIGNAL, to je iz 14 postaj slovenskega omrežja SIGNAL (brez Velike Polane, ki ni delovala), 5 referenčnih postaj avstrijskega omrežja APOS, 1 postaje madžarskega GNSSNet.hu ter 6 postaj hrvaškega CROPOS. Razporeditev postaje je prikazana na sliki 24. Dostop do podatkovnih tokov vseh postaj je bil vzpostavljen preko NTRIP Casterja omrežja SIGNAL, do podatkovnega toka referenčne postaje Zalaegerszeg pa neposredno preko NTRIP Casterja omrežja GNSSNet.hu.



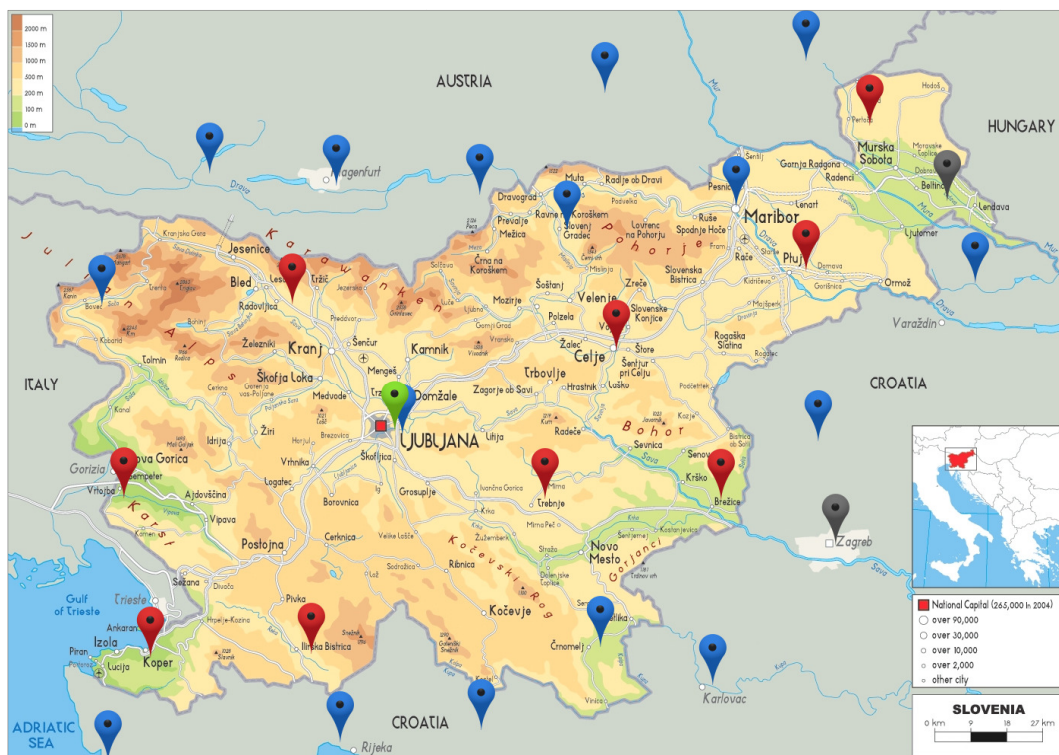
Slika 23: Na strehi poslovne stavbe na Litijski cesti 45 v Ljubljani sta nameščeni anteni stalno delujočih referenčnih postaj GSR1 (levo) in zasebne referenčne postaje podjetja Geoservis, d.o.o. (desno).

*Figure 23: GNSS antennas at the national reference station GSR1 (left) and private reference station Geoservis, d.o.o. (right) on the roof of an office building Litijska cesta 45, Ljubljana.*

V dejanskih omrežjih GNSS proizvajalec programske opreme za omrežja zahteva vsaj eno aktivno povezavo. V takšnem primeru gre za dvosmerno komunikacijo, ki omogoča celovito upravljanje s sprejemnikom – od nastavljanja, spremljanja delovanja in sprejemanja toka podatkov na zahtevo ali periodično. Aktivna povezava običajno poteka v proizvajalcu lastnem zapisu, kakršen je na primer Leica LB2. Zato, da je mogoče natančno izračunati zaostajanje podatkov (ang. Data Latency), je treba

uskladiti čas računalnika in čas GPS. V ta namen mora biti ena referenčna postaja (navadno tista z najbolj zanesljivo komunikacijo in optimalno postavitvijo) določena kot glavna (ang. Master Station). Aktivna povezava omogoča tudi prenos podatkov o efemeridah na zahtevo.

V nalogi je bila uporabljena (še sprejemljiva) možnost uporabe pasivne LB2 povezave s sprejemnikom, ki je nameščen na referenčni postaji Geoservis (slika 23). V tem primeru programska oprema sicer ne more zahtevati podatkov o efemeridah, ampak le-te pošlje sprejemnik samodejno, kadar je na voljo nov paket. Referenčna postaja Geoservis (ime postaje »Ephemerides«) je bila povezana v omrežje po protokolu TCP/IP, saj je že umeščena v okolje IT v podjetju. Naloga te dodatne referenčne postaje je bila torej izključno dostavljanje točnega časa in efemerid v osrednjo programsko opremo omrežja. Opazovanja iz te postaje niso bila uporabljena v mrežnem algoritmu.



-  Referenčne postaje GNSS
-  Referenčne postaje GPS
-  Referenčna postaja GNSS Geoservis
-  Nedelujoče referenčne postaje

Slika 24: Razporeditev referenčnih postaj GNSS slovenskega omrežja SIGNAL in partnerskih referenčnih postaj, ki so vključene v omrežje.

Figure 24: The map of national and partner reference stations included in Slovene GNSS network SIGNAL.

Seznam merske opreme, uporabljene na referenčnih postajah, je prikazan v preglednici 8.

Preglednica 8: Podatki o uporabljeni merski opremi na referenčnih postajah.

Table 8: Surveying equipment used at the reference stations.

Ime	Koda	Tip sprejemnika	Različica	Tip antene	GNSS
Bleiburg	BLEI	JPS LEGACY	2.6.1	JPSREGANT_DD_E	GG
Bodonci	BODO	TRIMBLE NETRS	1.1-5	TRM41249.00 TZGD	GPS
Bovec	BOVE	TRIMBLE NETR5	3.84	TRM55971.00 TZGD	GG
Brezice	BREZ	TRIMBLE NETRS	1.1-3	TRM41249.00 TZGD	GPS
Cakovec	CAKO	TRIMBLE NETR5	4.03	TRM55971.00 TZGD	GG
Celje	CELJ	LEICA GRX1200PRO	2.14	LEIAX1202 NONE	GPS
Crnomelj	CRNO	TRIMBLE NETR5	3.84	TRM55971.00 TZGD	GG
Delnice	DELN	TRIMBLE NETR5	3.60	TRM55971.00 TZGD	GG
Deutschlandsberg	DLBG	LEICA GRX1200+GNSS	7.80/4.004	LEIAR25.R3 LEIT	GG
Ephemerides	EPHE	LEICA GRX1200GGPRO	8.20/3.019	LEIAX1202GG	GG
Feldbach	FLDB	LEICA GRX1200+GNSS	7.80/4.004	LEIAR25.R3 LEIT	GG
Ilirska Bistrica	ILIB	TRIMBLE NETRS	1.1-5	TRM41249.00 TZGD	GPS
Karlovac	KARL	TRIMBLE NETR5	3.60	TRM55971.00 TZGD	GG
Klagenfurt	KLAG	JPS E_GGD	2.6.1	JPSREGANT_DD_E	GG
Koper	KOPE	LEICA GRX1200PRO	2.14	LEIAT504 LEIS	GPS
Landskron	LANK	JPS LEGACY	2.6.1	JPSREGANT_DD_E	GG
Ljubljana	GSR1	LEICA GRX1200GGPRO	7.02/3.019	LEIAT504GG LEIS	GG
Maribor	MARI	LEICA GRX1200GGPRO	7.53/3.019	LEIAT504GG LEIS	GG
Nova Gorica	NOVG	LEICA GRX1200PRO	2.10	LEIAT504 LEIS	GPS
Porec	PORE	TRIMBLE NETR5	4.03	TRM55971.00 TZGD	GG
Ptuj	PTUJ	LEICA GRX1200PRO	2.14	LEIAX1202 NONE	GPS
Radovljica	RADO	TRIMBLE NETRS	1.0-3	TRM41249.00 TZGD	GPS
Rijeka	RIJE	TRIMBLE NETR5	3.60	TRM55971.00 TZGD	GG
Slovenj Gradec	SLOG	TRIMBLE NETR5	4.03	TRM55971.00 TZGD	GG
Trebnje	TREB	TRIMBLE NETRS	1.1-5	TRM41249.00 TZGD	GPS
Zabok	ZABO	TRIMBLE NETR5	4.03	TRM55971.00 TZGD	GG
Zalaegerszeg	ZALA	LEICA GRX1200GGPRO	8.00/3.019	GPPNULLANTENNA	GG

### 3.3 Oprema za izvedbo terenskih meritev

#### 3.3.1 Uporabljena merska oprema

Za potrebe izmere RTK GNSS je bila uporabljena naslednja oprema:

- 4 sprejemniki GNSS Leica Viva GS10 z nameščeno različico strojne programske opreme SmartWorx Viva 3.52 (31.07.2011) in različico systemske programske opreme merilnega jedra 4.007,
- 4 pomnilniške kartice SD SunDisk Extreme 8 GB,
- 4 komunikacijski moduli Leica GFU24 z vgrajenim modemom GSM/GPRS Siemens MC75,
- 4 antene GSM Leica GAT18,

- 3 terenski kontrolerji Leica Viva CS10,
- 1 terenski kontroler Leica Viva CS15,
- 1 antena GNSS Leica AS10,
- 1 aktivni antenski delilnik GPS Networking ALDCBS1X4,
- 10 m antenski kabel za povezavo antene GNSS in delilnika,
- 4 antenski kabli 1.2 m za povezavo sprejemnikov GNSS in antenskega delilnika,
- 8 Li-ion baterij Leica GEB221 za napajanje sprejemnikov GNSS,
- 4 Li-ion baterije Leica GEB211 za napajanje terenskih kontrolerjev,
- svinčeni akumulator 110 Ah s polnilnikom,
- stativ Leica GST120-9,
- podnožje z optičnim grezilom Leica GDF122,
- nosilec antene Leica GRT146 in
- kljuka za določitev višine antene Leica GZS4.

Preglednica 9: Uporabljena merska oprema za izvedbo terenskih meritev.

Table 9: Surveying equipment used in the field tests.

Komplet	1	2	3	4
<b>Oprema</b>				
Sprejemnik GNSS	GS10 #1530164	GS10 #1530189	GS10 #1530017	GS10 #1531215
Terenski kontroler	CS15 #1590163	CS10 #1545863	CS10 #1500111	CS10 #1560040
Antena GNSS	AS10 #9341063			

Štirje sprejemniki GNSS Leica Viva GS10 so bili preko antenskega delilnika priključeni na isto anteno Leica AS10 (slika 25). Sprejemniki in terenski kontrolerji so imeli vstavljene baterije, dodatno pa so bili povezani še na zunanji akumulator, tako da je bila zagotovljeno neprekinjeno delovanje vsaj 24 ur.



Slika 25: Merska oprema med izvajanjem meritev. Na sredini je viden antenski delilnik.

Figure 25: Surveying equipment during field test. Black box in the middle is antenna splitter.



### 3.3.2 Tehnični podatki o merski opreми

#### Sprejemnik GNSS Leica Viva GS10



Slika 26: Sprejemnik GNSS Leica Viva GS10 – sprednja stran (levo) in spodnja stran (desno) z vsemi priključki, statusnimi LED in ležišči za baterije.

*Figure 26: GNSS receiver Leica Viva GS10 – front side (left) and bottom side (right) with connection board, status indicators and battery compartments.*

- Sprejemnik GNSS
  - o 120 kanalov
  - o Zmožnost hkratnega sledenja 60 satelitov na dveh frekvencah
  - o Zmožnost sledenja signalov
    - GPS: L1, L2, L2C, L5
    - GLONASS: L1, L2
    - Galileo (Test): GIOVE-A, GIOVE-B
    - Galileo: E1, E5a, E5b, Alt-BOC
    - Compass
    - SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS
  - o Tehnologija Leica SmartTrack
    - Korelator PAC (ang. Pulse Aperture Correlator) za natančno merjenje pservdorazdalje
    - Odlično sledenje satelitov z nizkim višinskim kotom
    - Opazovanja faze nosilnega signala z ločljivostjo <math><0.5\text{ mm}</math>
    - Odpornost na interference
    - Neodvisna opazovanja kode in faze na vseh frekvencah
- Natančnost določitve položaja RTK (ISO 17123-8)
  - o Statična meritev po inicializaciji: 5 mm + 0.5 ppm (RMS, položajno)
  - o V gibanju po inicializaciji: 10 mm + 1 ppm (RMS, položajno)
- Natančnost določitve položaja z naknadno obdelavo opazovanj (ISO 17123-8)
  - o Statična metoda, dolga opazovanja: 3 mm + 0.1 ppm (RMS, položajno)
  - o Statična in hitra statična metoda: 5 mm + 0.5 ppm (RMS, položajno)
  - o Kinematična metoda: 10 mm + 1 ppm (RMS, položajno)
- Sprotna inicializacija (ang. On-the-Fly)
  - o Patentiran algoritem Leica SmartCheck
  - o Zanesljivost inicializacije: > 99.99%



- Potreben čas za inicializacijo: tipično 4 s
- Merilni doseg: do 70 km
- Izmera RTK v omrežju GNSS
  - Tehnologija Leica SmartRTK, ki omogoča unificirano mrežno rešitev
  - Podpora omrežjem/konceptom: MAC, i-MAX, VRS, FKP
- Dimenzije in teža
  - 212 mm × 166 mm × 79 mm
  - 1.20 kg
- Okoljski pogoji delovanja
  - Temperaturno območje delovanja: -40 °C do +65 °C
  - Vlažnost: 100%
  - Odpornost na vodo in prah: IP68 (potopitev v vodo do globine 1.4 m, največ 2 h)
  - Odpornost na vibracije: prenese močne vibracije med delovanjem
  - Odpornost na padce: prenese padec iz višine 1.0 m na trdo podlago
  - Odpornost na udarce: prenese pospešek 40 g / 15 ms do 23 ms, pri postavitvi sprejemnika »vse na togem grezilu« ni prekinitve sledenja signalov pri udarcu ob padcu togega grezila za 150 mm
- Napajanje
  - Poraba: tipično 3.2 W, 270 mA
  - Notranje baterije: dve izmenljivi bateriji, izmenljivi med delovanjem (zaporedno praznjenje), Li-ion, 4.4 Ah, 7.4 V, zadostuje za do 14 ur neprekinjenega merjenja RTK ob vzpostavljeni GSM/GPRS povezavi
  - Zunanje napajanje: od 10.5 V do 28 V
- Shranjevanje podatkov
  - Pomnilniška kartica SD: 1 GB, zadošča za 6800 ur surovih opazovanj z intervalom shranjevanja 15 s, ali za 1.440.000 točk skupaj s tematskimi podatki v primeru izmere RTK, pri številu satelitov 12 GPS + 8 GLONASS
  - Shranjevanje surovih opazovanj
    - RINEX, Leica MDB
    - Interval shranjevanja 0.05 s do 60 s
- Uporabniški vmesnik
  - Gumb za vklop/izklop
  - Funkcijski gumb za podporo pri upravljanju brez terenskega kontrolerja (začetek shranjevanja pri statični izmeri, izbira med načinom delovanja kot referenčni ali premični sprejemnik)
  - Svetlobni indikatorji za prikaz stanja povezave Bluetooth, načina določitve položaja, stanja povezave RTK, prikaz shranjevanja surovih opazovanj in stanja napajanja (za obe notranji bateriji in zunanje napajanje)
- Podatkovni vmesniki in komunikacija
  - Vgrajeni vmesniki
    - 2 zaporedna vmesnika RS232
    - 1 kombiniran vmesnik USB/RS232
    - 1 vmesnik za priklop zunanjega napajanja
    - 1 brezžični vmesnik Bluetooth
    - Možnost hkratne uporabe do 3 podatkovnih vmesnikov
  - Zunanji komunikacijski vmesniki

- Možnost priključitve poljubnega UHF/VHF radio modema preko vmesnika RS232
- Možnost priključitve radio modema v Leicinem ohišju GFU
- Možnost priključitve poljubnega GSM/GPRS/UMTS (HSDPA) modema
- Možnost priključitve GSM/GPRS/UMTS modema v Leicinem ohišju GFU
- Podprti komunikacijski protokoli
  - Proizvajalcu lastni protokoli: Leica, Leica 4G, CMR, CMR+
  - RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1
  - NMEA 0183 v2.20 in proizvajalcu lastni protokol

### Terenski kontroler Leica Viva CS10/CS15



Slika 27: Terenska kontrolerja Leica Viva CS10 (levo) in CS15 (desno).

Figure 27: Field controllers Leica Viva CS10 (left) and CS15 (right).

- Splošni podatki
  - Operacijski sistem: Microsoft Windows CE 6.0
  - Procesor: Freescale i.MX31 533 MHz ARM
  - Delovni pomnilnik: 512 MB DDR SDRAM
  - Pomnilnik: 1 GB Flash
  - Zaslona: pokončen (CS10) ali ležeč (CS15), diagonala 8.9 cm, 640x480 slikovnih elementov, tehnologija zaslona TFT, na dotik občutljiv, LED protiosvetlitev
  - Vgrajena digitalna kamera z 2 MP slikovnih elementov
  - Vgrajena zvočnik in mikrofon
- Podatkovni vmesniki
  - Ležišče za pomnilniške kartice SD in CF
  - Vmesnika RS232 in miniUSB
  - Vmesnik USB A Host za priključitev pomnilniškega ključa USB
  - Priključek za zunanje napajanje
- Brezžični vmesniki
  - Bluetooth 2.0
  - Brezžično omrežje Wi-Fi 802.11b/g
  - Radio modem 2.4 GHz za upravljanje samodejnega tahimetra
  - 3.5G GSM/UMTS modem

- Vse antene brezžičnih komunikacijskih vmesnikov so integrirane v ohišju kontrolerja (tehnologija Leica Intenna)
- Možnost namestitve zunanjega brezžičnega vmesnika LR Bluetooth z dosegom 1.000 m za upravljanje samodejnega tahimetra
- Napajanje:
  - Izmenljiva baterija, Li-ion, 2.600 mAh, 7.4 V, zadostuje za 10 ur neprekinjenega delovanja (8 ur ob uporabi vgrajenega GSM/UMTS modema)
  - Zunanje napajanje: 10.5 V do 28 V
- Dimenzije in teža
  - CS10: 200 mm × 102 mm × 45 mm, 0.56 kg
  - CS15: 245 mm × 125 mm × 45 mm, 0.71 kg
- Okoljski pogoji delovanja
  - Temperaturno območje delovanja: -30 °C do +60 °C
  - Vlažnost: 100%
  - Odpornost na vodo in prah: IP67 (potopitev v vodo do globine 1 m, največ 30 min)
  - Odpornost na padce: prenese padec iz višine 1.2 m na trdo podlago

### Antena GNSS Leica AS10



Slika 28: Antena GNSS Leica AS10.  
*Figure 28: GNSS antenna Leica AS10.*

- Tehnologija GNSS
  - Leica SmartTrack
  - Sledenje signalov
    - GPS L1, L2, L5
    - GLONASS L1, L2
    - Galileo E1, E5a, E5b, E5ab AltBOC
    - Compass
  - Vgrajena podnožna plošča
  - Dimenzije: 170 mm (premer) × 62 mm
  - Teža: 0.44 kg
  - Ojačanje 29±3 dBi
  - Okoljski pogoji
    - Temperaturno območje delovanja: -40 °C do +70 °C
    - Vlažnost: 100%
    - Odpornost na vodo in prah: IP68 (potopitev v vodo do globine 1.4 m, največ 2 h)
    - Odpornost na vibracije: prenese močne vibracije med delovanjem
    - Odpornost na padce: prenese padec iz višine 1.5 m na trdo podlago in padec togega grezila 2 m na trdo podlago

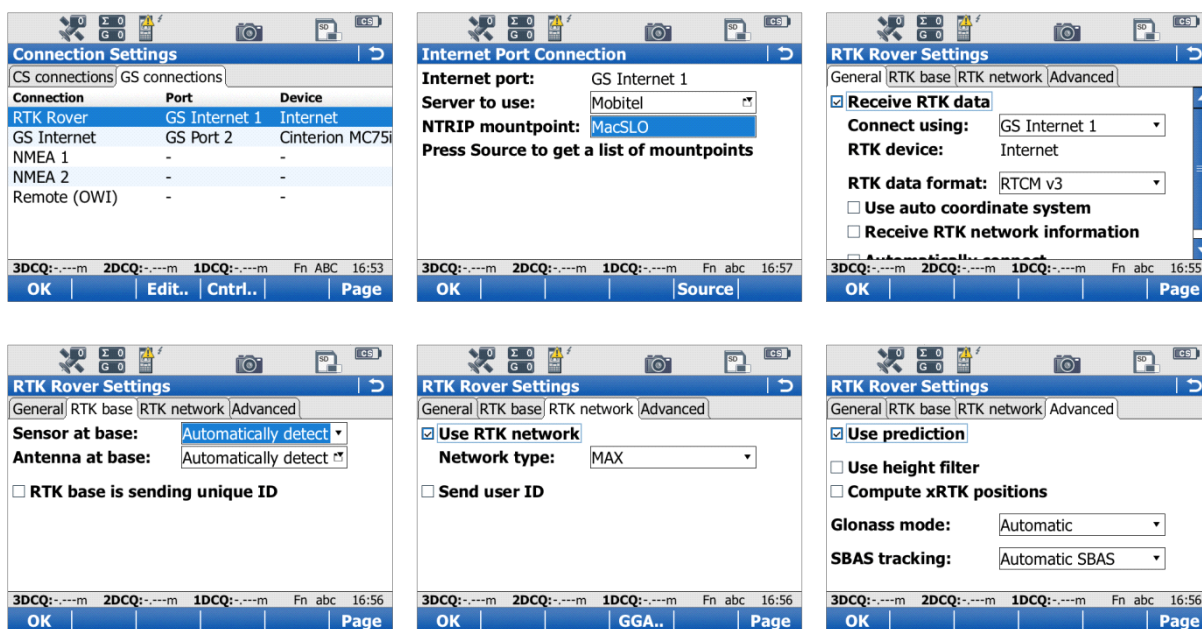
### 3.3.3 Nastavitev sprejemnikov GNSS

Pred izvedbo meritev RTK so bili vsi sprejemniki ponastavljeni – formatiran je bil sistemski pomnilnik, vgrajeni pomnilnik ter pomnilniške kartice SD. Nameščena je bila aktualna različica terenske programske opreme Leica SmartWorx Viva 3.52 ter strojna programska oprema merilnega jedra različice 4.007.

Na sprejemnikih so bile nastavljene naslednje možnosti:

- sledenje signalov GLONASS: ne (razen v primeru povezave na najbližjo referenčno postajo pri testu proizvodov omrežja SIGNAL),
- višinski kot za sledenje signalov: 10°,
- tip antene: Leica AS10 Tripod (odmik po višini od izhodišča za merjenje s kljuko Leica GZS4-1 do referenčne točke antene 0.360 m),
- shranjevanje surovih opazovanj za potrebe naknadne obdelave: ne,
- mobilna internetna povezava,
- parametri za dostop do storitev RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja GNSS po protokolu NTRIP,
- tip antene in sprejemnika na referenčni postaji: samodejna določitev iz toka podatkov RTCM,
- samodejno shranjevanje točk z intervalom 1 s,
- shranjevanje sporočil LB2 (Leica Binary 2) in
- samodejna ponovna inicializacija sprejemnika.

Zaslonske slike terenskega kontrolerja z nekaterimi nastavitvami so prikazane na sliki 29.

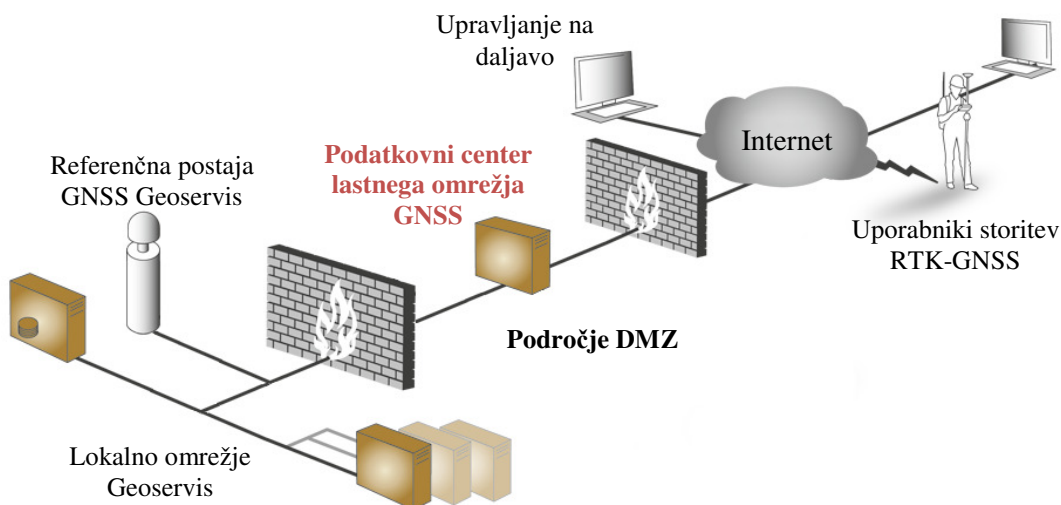


Slika 29: Zaslonske slike terenskega kontrolerja s prikazom komunikacijskih nastavitvev in nastavitvev RTK.  
Figure 29: Screenshots of a field controller show connection settings, internet port settings and RTK rover settings.

### 3.4 Računalniška oprema

#### 3.4.1 Infrastruktura IKT

Podatkovni center lastnega omrežja GNSS je bil vzpostavljen v prostorih podjetja Geoservis, d.o.o. Zaradi omejenih finančnih in logističnih zmožnosti arhitektura strežniške opreme ni bila vzpostavljena kot porazdeljena, ampak je bila vsa programska oprema nameščena na enem računalniku. Ker je bil isti računalnik zadolžen tudi za razpošiljanje popravkov RTK, je bil postavljen v demilitarizirano cono (ang. Demilitarized Zone, DMZ) lokalnega omrežja podjetja Geoservis, kar sicer ni praksa v dejanskih podatkovnih centrih (slika 30). Računalnik je bil povezan v internet preko obstoječe komunikacijske opreme v podjetju. Uporabljena je bila simetrična 20 Mb/20 Mb optična povezava (FTTH).



Slika 30: Umestitev podatkovnega centra lastnega omrežja GNSS v okolje Geoservis.  
Figure 30: Own GNSS network central computer of inside Geoservis' IT environment.

Za potrebe vzpostavitve podatkovnega centra je bil uporabljen računalnik Lenovo ThinkStation E20i z naslednjo opremo:

- 4-jedrni procesor Intel Xeon QuadCore X3450 s tehnologijo Intel Hyper-Threading, delovno frekvenco 2.66 GHz (3.2 GHz z Intel Turbo Boost) in medpomnilnikom L2 velikosti 8 MB
- delovni pomnilnik 4 GB,
- trdi disk Western Digital WD10EADS 1TB,
- grafična kartica ATI Radeon x300,
- vgrajena mrežna povezava Ethernet 10/100/1000 Mbps,
- operacijski sistem Microsoft Windows Server 2003 Standard Edition x64 SP2.

Na istem računalniku so bili nameščeni vsi strežniki programskega paketa za upravljanje omrežij Leica GNSS Spider različice 4.1.0 build 3784 (25.08.2011).

#### 3.4.2 Programska oprema za upravljanje omrežji GNSS

GNSS Spider je osrednji del Leicinih rešitev za upravljanje referenčnih postaj in omrežij GNSS. Zaradi svoje modularne in nadgradljive zasnove omogoča upravljanje ene ali tisoč referenčnih postaj. Programska oprema je sestavljena iz 5 ključnih delov: Site Serverja, Network Serverja, Cluster Serverja, RTK Proxy Serverja in uporabniškega vmesnika Spider GUI, ki so podrobneje opisani v nadaljevanju. Vsi strežniški deli lahko delujejo na istem računalniku ali pa so porazdeljeni na več

računalnikov. Porazdeljena arhitektura omogoča racionalno izrabo procesorske moči pri večjih omrežjih in večjem številu uporabnikov, dodatno pa tudi vgradnjo nadštevilnosti za najvišjo zanesljivost storitev omrežja GNSS. Leica GNSS Spider je zasnovan tako, da učinkovito izkorišča sodobne večprocesorske in večjedrne sisteme, zato so tudi zahteve programa glede strojne opreme relativno nizke. Na eni zmogljivejši delovni postaji s procesorjem Intel Xeon, 2.6 GHz in 2 GB RAM lahko deluje:

- Site Server z do 100 referenčnimi postajami GNSS s tokom podatkov 1 Hz in ustvarjanjem 1-urnih datotek s surovimi opazovanji, ali
- Cluster Server z do 25 referenčnimi postajami GNSS na vsako procesorsko jedro, torej 100 referenčnih postaj na 4-jedrnem procesorju, ali
- Network Server z do 150 referenčnimi postajami vključenimi v omrežje
- RTK Proxy Server z do 500 hrati povezanimi uporabniki storitev RTK posamezne ali najbližje referenčne postaje, oziroma 300 hrati povezanimi uporabniki, ki uporabljajo mrežne proizvode (MAX), oziroma 250 hkrati povezanimi uporabniki, ki uporabljajo individualizirane mrežne proizvode (i-MAX) (Leica Geosystems, 2011).



Slika 31: Zaslonska slika Leica GNSS Spider Network Serverja.

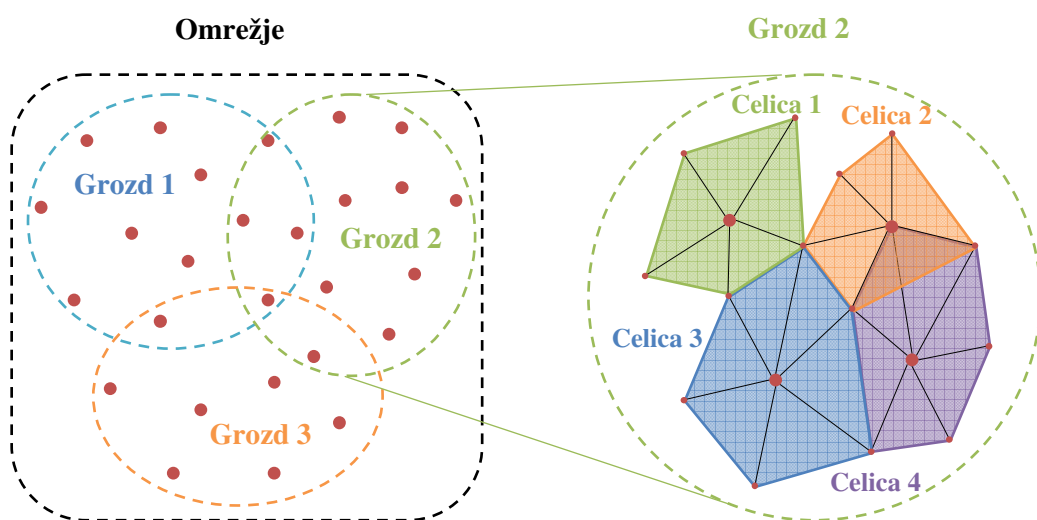
*Figure 31: Screenshot of Leica GNSS Spider Network Server.*

Procesno jedro SpiderNET vsebuje algoritme za mrežno analizo, ki so bili načrtovani in razviti tako, da so v popolnosti skladni s standardom RTCM 3.1. V Kalmanovem filtru se obdelujejo opazovanja kode in faze brez tvorjenja faznih razlik (ang. Zero-differenced, Undifferenced), da se določijo vse potrebne neznanke, vključno z neznankami celih začetnih valov celotnega omrežja in atmosferskimi modeli. Takšen koncept ima pred obdelavami dvojnih faznih razlik številne prednosti, saj zmanjšuje občutljivost sistema na prekinitve v toku podatkov, omogoča bolj učinkovito določitev vplivov na opazovanja, hkrati pa se izogne uporabi linearnih kombinacij opazovanj GNSS, ki povečujejo šum in občutljivost na večpotje. Poleg neznanh celih začetnih valov se v Kalmanovem filtru ocenijo še deterministični vplivi ionosfere in troposfere, pogreški urinih stanj satelitove in sprejemnikove ure ter pogreški orbit (Leica Geosystems, 2005). Jedro SmartNET za izboljšanje mrežne rešitve lahko izkoristi tudi podatke iz drugih virov, na primer najhitrejše precizne efemeride tako za sistem GPS kot GLONASS, predvidene vsebnosti elektronov v ionosferi (ang. Predicted ionosphere TEC) službe IGS ter kodne zamike DCB služb CODE ali AIUB, zato lahko uspešno uporablja signale celo s satelitov z višinskim kotom  $<10^\circ$  tudi v obdobjih povečane ionosferske aktivnosti. Jedro SmartNET izkorišča tudi prednost podajanja dvojnih koordinat referenčnih postaj. Koordinate v končnem, uporabniškem



datumu (ang. Product marker coordinates), na primer ETRS89, so podane v sistemu ECEF in se uporabljajo za vse proizvode omrežja GNSS, na primer podatke za naknadno obdelavo, popravke RTK in določitev koordinat novih točk z modulom Spider Positioning. Fizične koordinate (ang. Physical marker coordinates) pa se uporabljajo v mrežni analizi, saj bolj točno opisujejo dejanske položaje referenčnih postaj. Za optimalno delovanje mrežnega algoritma morajo biti čim bolj homogene, čim bolj natančne (3 mm/100 km) in skladne s trenutno epoho aktualne realizacije ITRF, saj so v tem sestavu podane tudi koordinate preciznih efemerid. Za določitev neznanega števila celih valov se uporablja uveljavljena metoda LAMBDA, Leicina tehnologija SmartCheck pa skrbi za neprestano periodično kontrolo rezultatov (Leica Geosystems, 2011a).

Iz praktičnih razlogov je obdelava opazovanj omrežja in priprave mrežnih popravkov razdeljena na sistem omrežja (ang. Network), grozdov (ang. Clusters) in celic (ang. Cells). Omrežje je skupina referenčnih postaj GNSS, ki so povezane v isti podatkovni center. Grozd je podmnožica referenčnih postaj, ki so v postopku mrežne analize obdelane skupaj. Skupni nivo fazne nedoločenosti se določi za vse postaje v grozdu. Za majhna omrežja so lahko vse postaje dodeljene enemu grozdu (do 100 postaj GPS+GLONASS na 4-jedrnem procesorju), pri večjih omrežjih, kjer je zaradi števila vključenih postaj treba porazdeliti procesorsko moč ali zagotoviti nadštevilnost, pa so posamezne postaje dodeljene različnim grozdom. Pri tem je treba upoštevati določeno prekrivanje med sosednjimi grozdi. Celica pa je skupina referenčnih postaj znotraj grozda, ki se uporabijo za ustvarjanje mrežnih popravkov. Razmerja med omrežjem, grozdom in celico so prikazana na sliki 32. Za pridobitev mrežnih popravkov zadostujejo že 3 referenčne postaje, optimalno pa 5 ali 6, tako zaradi geometrije celice, zanesljivejšega modeliranja vplivov na opazovanja, kot tudi zaradi nadštevilnosti v primeru izpada posamezne referenčne postaje (Leica Geosystems, 2005).

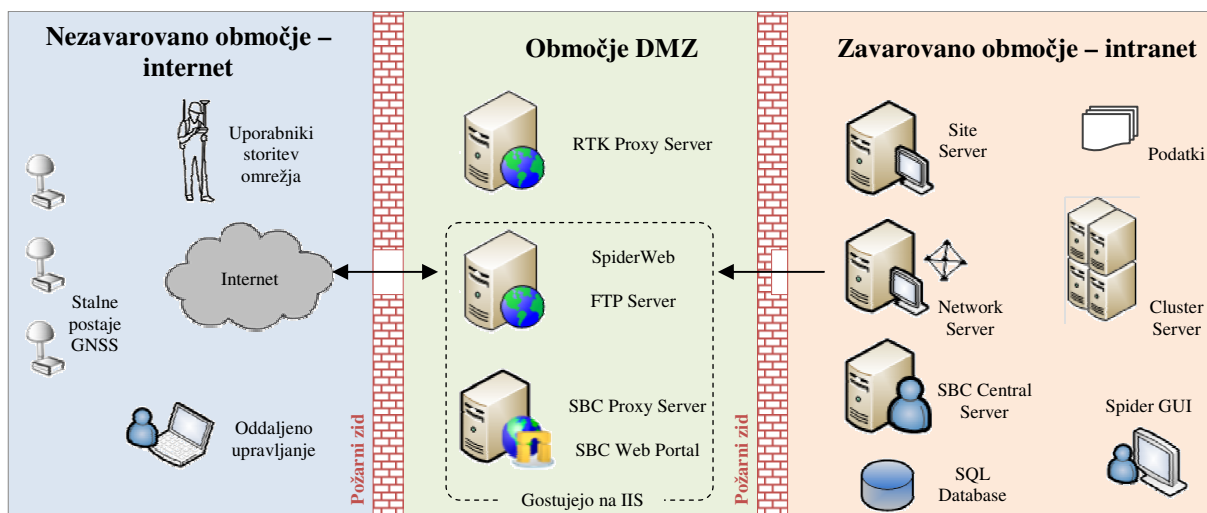


Slika 32: Razmerja med omrežjem, grozdom in celico omrežja referenčnih postaj GNSS.

Figure 32: Relationship between cell, cluster and network in a GNSS reference station network.

Ker so omrežja pogosto izpostavljena nevarnostim interneta, je arhitektura programa GNSS Spider prilagojena tudi za okolja IT z najvišjimi varnostnimi zahtevami. Zato sta upravljanje omrežja in obdelava podatkov ločena od razpošiljanja proizvodov omrežja, ne glede ali gre za popravke RTK, podatke za naknadno obdelavo opazovanj ali spletni portal za uporabnike (slika 33). Vsi Proxy strežniki so nameščeni zunaj požarnega zidu lokalnega omrežja, komunikacija med njimi in osrednjimi strežniki programa pa se vedno vzpostavlja od znotraj navzven, tako da so vsa vrata na

požarnem zidu navznoter zaprta. Prav tako so tudi občutljivi podatki o uporabnikih ter podatki za zaračunavanje storitev (dnevniške datoteke) shranjeni v podatkovnih bazah SQL za požarnim zidom. Zato ni nevarnosti, da bi heker, ki doseže Proxy strežnik (le-ti morajo biti odprti proti internetu) mogel priti tudi do občutljivih podatkov in ključnih delov sistema. Za še večjo stopnjo varnosti so Proxy strežniki varovani z dodatnim požarnim zidom, na katerem morajo biti navznoter odprta samo vrata za spletni strežnik (navadno 80), strežnik FTP (navadno 23) in vrata za razpošiljanje popravkov RTK (navadno 2101). Dodatno varnost zagotavlja tudi protokol NTRIP, ki omogoča, da ne glede na število uporabnikov RTK ves promet poteka preko enih samih vrat IP (Leica Geosystems, 2007).



Slika 33: Zasnova podatkovnega centra omrežja GNSS s stališča računalniške varnosti. Prirejeno po (Leica Geosystems, 2011).

Figure 33: Distributed installation of a data center in a corporate LAN with IT security in mind. Adapted from (Leica Geosystems, 2011).

### 3.4.3 Sistemska arhitektura in delovanje programa Leica GNSS Spider

Programska oprema Leica GNSS Spider je zasnovana modularno in skladno z arhitekturo odjemalec-strežnik. Sestavljajo jo naslednji deli:

- Site Server,
- Network Server,
- Cluster Server,
- RTK Proxy Server,
- Spider Business Center (SBC), ki ga sestavljajo
  - o SBC Central Server,
  - o SBC Proxy Server,
  - o SBC Web Application,
- Podatkovna baza SQL in
- Data Dispatcher.

Strežniška arhitektura programa jasno ločuje med grafičnim uporabniškim vmesnikom Spider GUI od posameznih servisov – dejanskih opravil v omrežju referenčnih postaj, ki jih izvajajo pripadajoči strežniki (Leica Geosystems, 2011).



Dodatno se v podatkovni center lahko vgradi še spletni portal omrežja Leica SpiderWeb ter program za samodejno analizo kakovosti postaj in podatkov Leica SpiderQC. Vsi strežniki so lahko nameščeni na enem (fizičnem) računalniku, na virtualiziranih računalnikih ali polju (fizičnih) strežnikov. S stališča stroškov strojne opreme, vzdrževanja, izkoriščenosti stojnih zmogljivosti opreme in porabe električne energije je najbolj smotrna porazdeljena namestitvev na več virtualiziranih strežnikov, oziroma vsaj na dva virtualizirana strežnika, kjer je eden nameščen v območje DMZ in gostuje RTK Proxy Server, SBC Proxy Server, SpiderWeb in FTP Server.

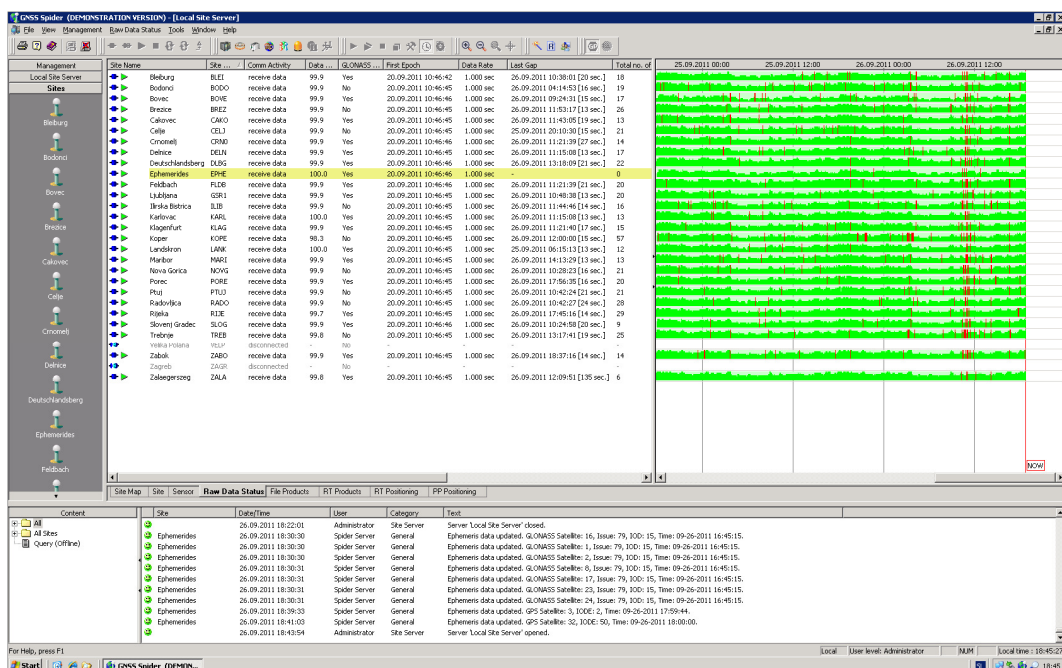
### ***GNSS Spider – Site Server***

Site Server izvaja osnovna opravila v omrežjih referenčnih postaj GNSS

- upravlja s postajami GNSS (nastavljanje in spremljanje delovanja),
- sprejema tokove surovih podatkov,
- prenaša datoteke s surovimi opazovanji, ki se lokalno shranjujejo na sprejemnikih,
- preverja in pretvarja podatke (na primer iz LB2, MDB, RTCM v RINEX; v drugačen interval shranjevanja, na primer v 30 s interval za potrebe priprave podatkov za globalna omrežja), stiska (Hatanaka, ZIP), arhivira in razpošilja na različne strežnike FTP,
- nadzoruje delovanje sistema in alarmira,
- izvaja obdelavo opazovanj in izračun baznih vektorjev v realnem času ali z naknadno obdelavo, na primer v aplikacijah za opazovanje premikov in deformacij naravnega ali grajenega okolja, ter
- omogoča oddaljeno nadgrajevanje systemske programske opreme sprejemnikov.

Ker se vse nastavitve lokacij, referenčnih postaj in proizvodov omrežja, pa tudi rezultati realno-časovne ali naknadne obdelave opazovanj hranijo v podatkovni bazi SQL, mora biti na istem računalniku nameščen tudi strežnik SQL.

Site Server omogoča upravljavcu omrežja preprost pregled nad delovanjem vseh postaj GNSS. Z grafičnimi znaki je prikazano delovanje posameznih sprejemnikov: vzpostavljena povezava, lokalno shranjevanje podatkov, lokalno pošiljanje popravkov RTK, sprotno pošiljanje podatkov in stanje sledenja signalov. Na časovnem traku »Raw Data Status« je prikazana zgodovina toka surovih podatkov in števila satelitov, kar omogoča hitro ugotavljanje težav s komunikacijo ali s postajo. Dodatno so v tabeli na voljo tudi podatki o deležu prejetih podatkov, številu prekinitev, zadnji prekinitvi in dolžini prekinitve (slika 34).



Slika 34: Prikaz stanja podatkovnih tokov iz posameznih referenčnih postaj.  
Figure 34: Raw data stream status for all reference stations.

Upravljanje z dogodki (ang. Event Management) omogoča samodejno pošiljanje sporočil SMS ali elektronske pošte enemu ali več upravljavcem omrežja ter alarmiranje v primeru pojavitve težav, kot je na primer prekinitev komunikacije s sprejemnikom, napaka pri prenosu lokalno shranjenih surovih opazovanj, pomanjkanje prostega pomnilnika na sprejemniku, pomanjkanje pomnilnika za shranjevanje na računalniku, manjkajoči podatki in drugo.

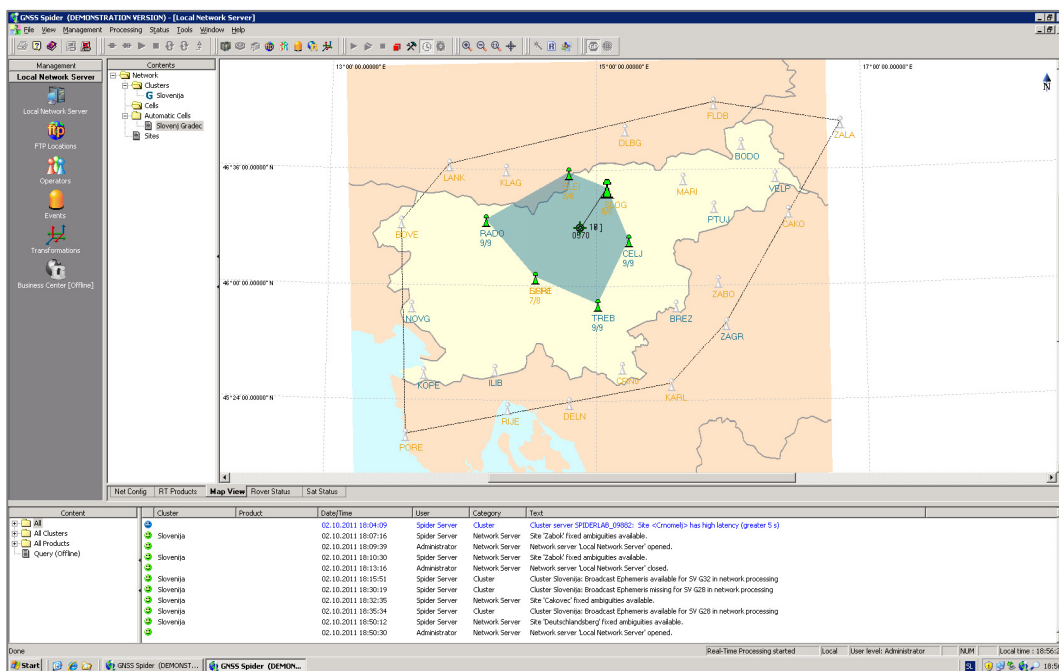
### GNSS Spider – Network Server

Network Server je osrednji del okolja SpiderNET in skrbi za izvajanje vseh opravil, povezanih z upravljanjem in nastavljanjem omrežja GNSS. Omogoča nastavljanje enega ali več strežnikov za upravljanje z grozdi (Cluster Server), strežnika za posredovanje realno-časovnih proizvodov omrežja (RTK Proxy Server) ter upravljanje mrežnih proizvodov RTK (ang. Real-Time Products). Network Server skrbi za upravljanje tokov podatkov z enega ali več Site Serverjev, ki so prirejeni omrežju, in njihovo posredovanje Cluster Serverjem, ki izvajajo mrežno analizo. Nadalje pa skrbi tudi za posredovanje surovih opazovanj referenčnih postaj s Site Serverjev ter mrežnih popravkov s Cluster Serverjev RTK Proxy Serverju, ki jih posreduje uporabnikom storitev RTK na terenu.

Ker se vse nastavitve omrežja, skupne obdelave omrežja ter nastavitve mrežnih proizvodov shranjujejo v podatkovni bazi, mora biti na istem računalniku nameščen tudi strežnik SQL.

Za upravljanje z uporabniki storitev omrežja GNSS, overjanje (ang. Authentication) in odobritev (ang. Authorization)<sup>10</sup> dostopa do storitev se Network Server povezuje s poslovnim strežnikom Spider Business Center.

<sup>10</sup> Avtentikacija pomeni ugotavljanje, kdo je uporabnik storitev, avtorizacija pa, do katerih storitev ima uporabnik dostop.



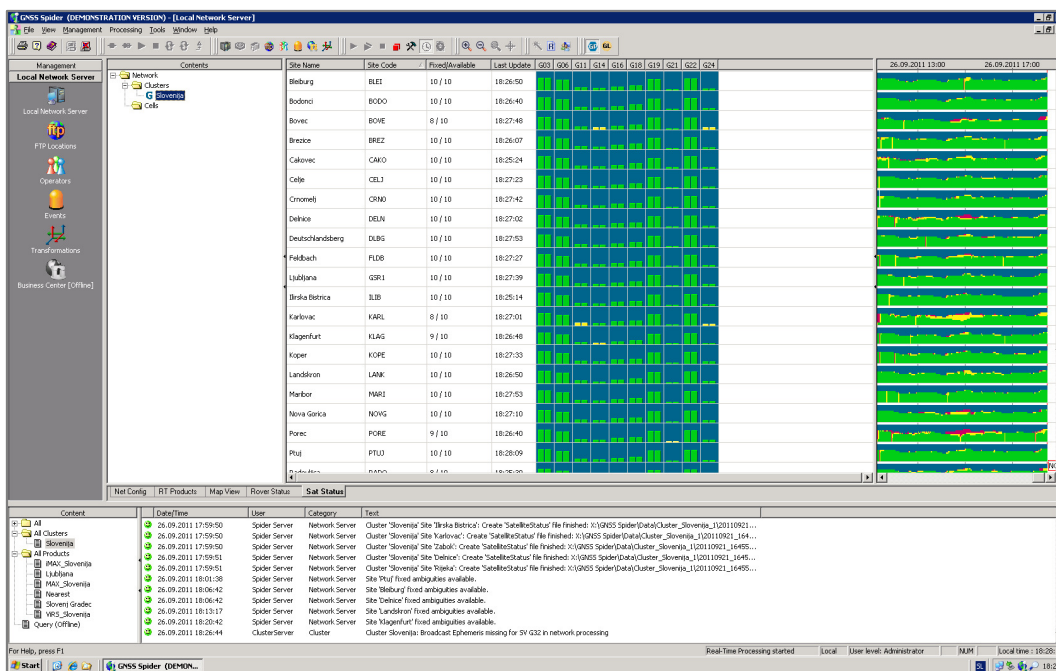
Slika 35: Grafični prikaz omrežja, aktivnosti posameznih referenčnih postaj, ustvarjenih celic ter vzpostavljenih realno-časovnih povezav omogoča upravljavcu celovit pregled nad delovanjem omrežja.

Figure 35: Map view of a GNSS network, clusters, automatically created cells and rover connections helps network operator to easily check network activities.

### GNSS Spider – Cluster Server

Procesno jedro sistema SpiderNET je Cluster Server. Le-ta v realnem času opravlja mrežno analizo in izračunava mrežne popravke. Ta strežnik nima neposrednega uporabniškega vmesnika, nastavlja se ga preko Network Serverja. Zavihek »Sat Status« omogoča grafičen vpogled v delovanje procesnega jedra sistema. Prikazuje število razpoložljivih in fazno določenih satelitov za vsako postajo. Višina stolpca predstavlja višinski kot satelita. Časovni trak prikazuje zgodovino rezultatov mrežne analize (slika 36).

Leica GNSS Spider omogoča, da se podatki celotnega omrežja obdelujejo na enem ali več Cluster Serverjih. S tem je omogočena vgradnja nadštevilnosti ter porazdelitev procesorskega bremena med več procesorskih jeder ali računalnikov v primeru zelo velikih omrežij GNSS (za primer več kot 100 referenčnih postaj GPS+GLONASS).



Slika 36: Delovanja procesnega jedra SpiderNET prikazuje seznam, kjer so z barvnimi stolpci prikazana stanja posameznih satelitov.

Figure 36: SpiderNET processing kernel activity is shown using color-coded satellite status bar graphs.

### Mrežni proizvodi RTK

Za dostop do storitev omrežja GNSS je treba v Network Serverju ustvariti različne proizvode RTK, ki so preko RTK Proxy Serverja dostopni uporabnikom premičnih sprejemnikov. RTK Proxy Server gostuje tudi NTRIP Caster.

Obstajajo štirje tipi proizvodov RTK:

- prednastavljena referenčna postaja (ang. Single Site),
- prednastavljena celica (ang. Single Cell),
- najbližja referenčna postaja (ang. Nearest Site) in
- samodejna celica (ang. Automatic Cell).

Obe prednastavljeni možnosti zagotavljata uporabniku popolno transparentnost, saj le-ta natančno ve, katere referenčne postaje so uporabljene pri določenem proizvodu RTK, ti proizvodi pa omogočajo uporabo tudi pri samo enosmerni komunikaciji. Vendar pa je uporabnik v takem primeru sam odgovoren za izbiro najprimernejšega proizvoda RTK. Pri samodejnih proizvodih (samodejna celica in najbližja postaja) pa nalogo izbire najprimernejših referenčnih postaj prevzame programska oprema v centru omrežja. Pri samodejni izbiri najbližje referenčne postaje ali samodejne celice program upošteva različne kriterije: položaj premičnega sprejemnika (nujno potrebna dvosmerna komunikacija), stanje komunikacijskih povezav do referenčnih postaj, število satelitov, ki jih sledijo posamezne referenčne postaje in stanje fazne nedoločenosti za posamezne postaje. Med gibanjem premičnih sprejemnikov po terenu pa tudi v primeru morebitnega izpada posamezne postaje lahko GNSS Spider sproti prilagaja optimalno kombinacijo referenčnih postaj ali celo preklopi z mrežnega proizvoda na najbližjo postajo. Za uporabnika omrežja to sicer lahko pomeni določeno izgubo nadzora, vendar pa GNSS Spider z neprekinjenim ocenjevanjem delovanja omrežja, sprotim sledenjem položaja uporabnika in številnimi kriteriji zagotavlja najvišji nivo storitve tako glede

zanesljivost kot razpoložljivosti. Pri tem zanesljivost storitve pomeni, da proizvodi RTK vsebujejo samo podatke, ki zagotavljajo hitro inicializacijo ter pridobitev kakovostnega položaja; razpoložljivost pa pomeni, da so referenčni podatki na voljo vedno, ne glede na izpade posamezne referenčne postaje iz katerega koli vzroka. Samodejni proizvodi RTK predstavljajo prednost tudi za upravljavca omrežja GNSS, saj je treba nastaviti manj različnih proizvodov (na primer samo enega za izbiro najbližje referenčne postaje in po enega mrežnega s samodejno izbiro celice za vsak zapis podatkov, na primer RTCM 2.3 in RTCM 3, oziroma za vsak mrežni koncept, na primer MAC in VRS). Dodatno pa operater zaradi sprejemanja podatkov o položaju premičnih sprejemnikov, ki je potrebno v primeru samodejnih proizvodov RTK, prejema tudi določeno povratno informacijo o obnašanju uporabnikov, ponudi pa lahko tudi lokacijske storitve (sledenje).

### ***Izbira najbližje referenčne postaje***

Leica GNSS Spider po sprejemu standardnega sporočila NMEA GGA, ki vsebuje položaj sprejemnika, število uporabljenih satelitov, tip rešitve in latenco popravkov RTK, najprej uredi vse razpoložljive referenčne postaje po oddaljenosti od položaja premičnega sprejemnika. Iz tega seznama določi najbližjo referenčno postajo ter vse postaje, ki se nahajajo znotraj dodatne največje razdalje (privzeto 5 km). Iz te množice nato določi tisto referenčno postajo, ki sprejema signale iz največjega števila satelitov. Kot najbližja referenčna postaja se lahko izbere tudi postaja, ki je do 5 km bolj oddaljena od dejansko najbližje v primeru, da sledi najmanj 2 satelita več. Dodaten kriterij za izbiro najprimernejše postaje je tudi vsota višinskih kotov do vseh satelitov (Leica Geosystems, 2010c).

### ***Izbira samodejne celice***

Izbira in ustvarjanje nove celice se začne vsakič,

- ko se premični sprejemnik poveže na strežnik RTK in pošlje sporočilo NMEA GGA,
- ko se premični sprejemnik premakne za več kot nastavljeno razdaljo (ang. Re-check if rover moves),
- če glavna postaja preneha pošiljati opazovanja za več kot 5 s (prekinitev podatkov),
- če za glavno ali katero koli pomožno postajo niso na voljo mrežni popravki za več kot 5 s,
- če katera koli postaja začne pošiljati opazovanja in
- če so za katero koli postajo na voljo novi mrežni popravki (na primer kadar Cluster Server izračuna novo fazno nedoločenost za določen par satelit-referenčna postaja).

Osnovni algoritem zahteva izbiro najbližje referenčne postaje, iskanje druge najbližje referenčne postaje znotraj prednastavljene največje razdalje, ki sledi vsaj 2 satelita več kot dejansko najbližja, izbiro  $i$  naslednjih najbližjih – pomožnih postaj in izločitev postaj, ki sledijo manj kot  $n$  satelitov. Za izbiro najprimernejših postaj, ki bodo skupaj sestavljale celico, GNSS Spider upošteva številne kriterije:

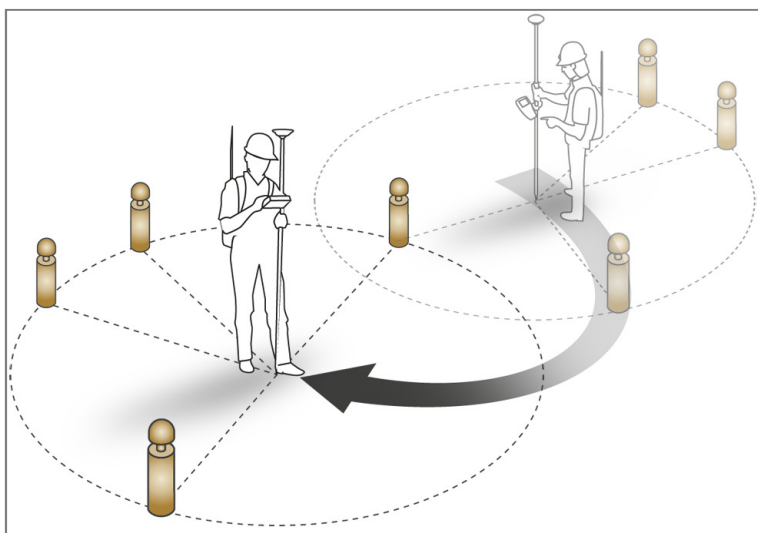
- število satelitov z znano fazno nedoločenostjo na referenčni postaji,
- geometrijo celice, da se prepreči ekstrapolacija mrežnih popravkov in
- razdaljo do najbližje in najbolj oddaljene postaje v celici, da se zagotovi primernost modeliranih mrežnih popravkov za dejanski položaj premičnega sprejemnika.

Dodatno algoritem sproti oceni tudi, kateri sateliti so vidni na položaju premičnega sprejemnika in kateri sateliti so ugodno razporejeni po nebu. Osnovni algoritem je nadgrajen tako, da se po začetnem

iskanju  $i$  najbližjih referenčnih postaj v okolici premičnega sprejemnika določi vse možne celice z več kot tremi referenčnimi postajami, nato pa oceni vsako celico po številnih kriterijih:

- ali je premični sprejemnik znotraj celice,
- razdalja med premičnim sprejemnikom in najbližjo postajo,
- število skupnih satelitov na vseh referenčnih postajah znotraj posamezne celice,
- povprečno število satelitov z znano fazno nedoločenostjo na vsaki postaji,
- primernost geometrije celice (razmerje med površino in obsegom) ter
- število postaj v celici.

Za vsako potencialno celico se nato opravi še iskanje najboljše glavne referenčne postaje. Za izbiro glavne referenčne postaje se poleg oddaljenosti od trenutnega položaja premičnega sprejemnika, števila satelitov in števila znanih faznih nedoločenosti upošteva tudi vsota višinskih kotov do vseh satelitov. Za vsako potencialno celico se določita dva najboljša kandidata za glavno postajo. Na osnovi različnih uteži za izbiro celice in izbiro glavne postaje se določi najprimernejša kombinacija (ang. Highest ranked master-cell-combination) (Leica Geosystems, 2010c). Izbira celice se ves čas vzpostavljenе povezave z omrežjem preverja. V primeru, da je na voljo boljša celica, GNSS Spider prekine povezavo in začne pošiljati popravke RTK za novo celico (slika 37). Premični sprejemnik se mora v tem primeru sicer ponovno inicializirati, vendar mu ni treba zavreči predhodnih podatkov o sistemu (ni treba inicializirati Kalmanovega filtra, s katerim določa položaj), saj so vse referenčne postaje na istem nivoju fazne nedoločenosti. Če pa glavna postaja ostane ista, premični sprejemnik ne opazi prekinitve v toku podatkov in ponovna inicializacija ni potrebna. Za oblikovanje celice in pridobitev mrežnih popravkov je potrebnih najmanj 4+1 satelit za vsak sistem GNSS (za celico samo s postajami GPS to pomeni najmanj 5 satelitov, za celico s postajami GPS+GLONASS pa to pomeni 4 GPS + 2 GLONASS-satelita, ali 3 GPS + 3 GLONASS-satelite) (Leica Geosystems, 2011a).



Slika 37: Izbira celice ter glavne postaje se v osrednji programski opremi omrežja GNSS ves čas preverja in prilagaja položaju premičnega sprejemnika in razmeram v omrežju.

*Figure 37: The creation of automatic cell and selection of a master station is continuously monitored and optimized.*

### ***Samodejen preklop na najbližjo referenčno postajo***

Pri mrežnih proizvodih RTK, kjer se interpolacija mrežnih popravkov izvaja na strežniku (i-MAX, VRS), ima upravljavec omrežja v primeru izpada mrežnih popravkov možnost nastavitve samodejnega preklopa na najbližjo referenčno postajo (ang. Fallback). S tem se zagotovi večja razpoložljivost storitev RTK.

Preklop na najbližjo referenčno postajo se zgodi v primeru, če mrežnih popravkov ni na voljo (ni dovolj satelitov z znano fazno nedoločenostjo na zadostnem številu postaj v celici). Preklop pa se zgodi, tudi če

- ena od referenčnih postaja sledi vsaj 6 satelitov več, kot je skupnih fazno določenih satelitov v omrežju ali,
- če je oddaljenost med premičnim sprejemnikom in glavno referenčno postajo dovolj majhna (parameter je nastavljen, privzeta vrednost pa je 3 km).

V prvem primeru zaradi boljše geometrijske razporeditve satelitov zaradi njihovega večjega števila premični sprejemnik navadno hitreje in bolj zanesljivo izračuna fazno nedoločenost. V drugem primeru, ko je premični sprejemnik blizu referenčne postaje, pa modelirani ionsferski in troposferski vplivi na (oddaljenih) pomožnih postajah ne predstavljajo več dodatne informacije ali celo kvarno vplivajo na določitev položaja premičnega sprejemnika. V primeru zelo kratkih baznih vektorjev (pod 3 km) so vplivi na opazovanja glavne postaje in premičnega sprejemnika močno korelirani (enaki), da se v postopku dvojnih faznih razlik izničijo. Preklop na najbližjo referenčno postajo se zgodi v 30 s, ko so izpolnjeni kriteriji za preklop, pred tem (15 s po izpolnitvi kriterijev) Leica GNSS Spider poskuša še določiti novo celico. Ko se zgodi preklop na najbližjo referenčno postajo, se mora premični sprejemnik ponovno inicializirati. Uporabnik preko sporočila RTCM 3 1029 prejme informacijo o preklopu tudi na zaslonu instrumenta ter v dnevniški datoteki na instrumentu (ang. Message log).

Preklop na najbližjo postajo ni na voljo v primeru mrežnih popravkov MAX, saj so premičnemu sprejemniku v tem primeru že sama po sebi vedno na voljo celotna opazovanja glavne referenčne postaje. To je pomembna lastnost koncepta MAC, ki omogoča premičnemu sprejemniku vso fleksibilnost pri izbiri optimalne referenčne postaje ali kombinacije postaj (Leica Geosystems, 2010c).

### ***GNSS Spider – RTK Proxy Server***

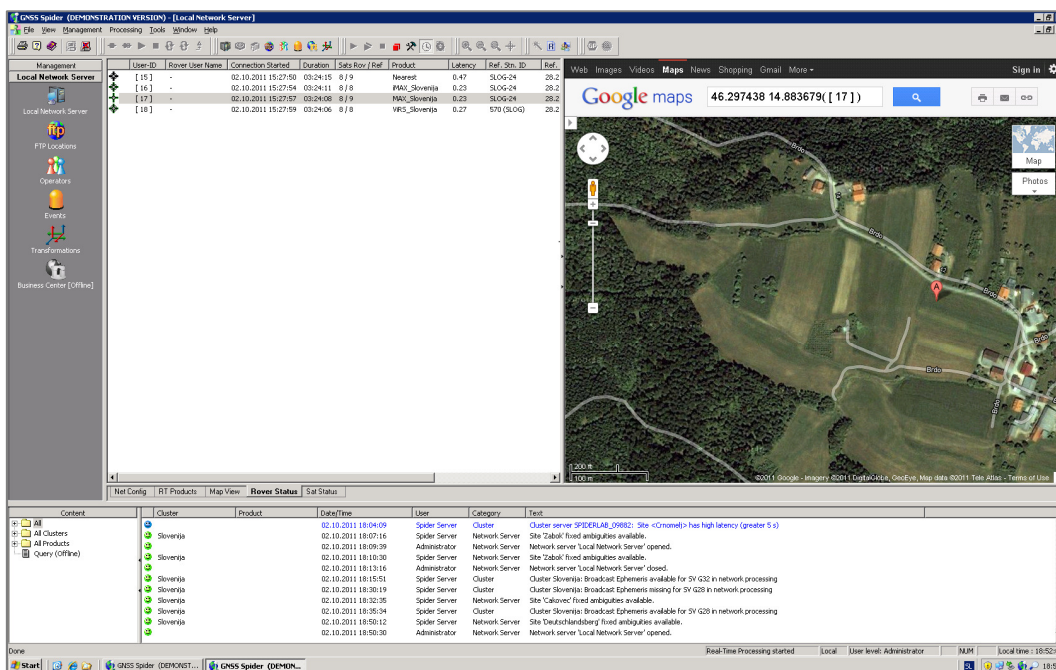
RTK Proxy Server je posrednik realno-časovnih podatkov uporabnikom na terenu. Omogoča posredovanje popravkov RTK, ustvarjenih neposredno iz tokov podatkov posameznih referenčnih postaj GNSS, ki jih sprejema Site Server, ter mrežnih proizvodov, ki jih izračunava Cluster Server.

Zavihek »Rover Status« na Network Serverju omogoča vpogled na strežnik RTK, saj RTK Proxy nima svojega neposrednega uporabniškega vmesnika. Seznam trenutno povezanih realno-časovnih uporabnikov prikazuje ime uporabnika, uporabljen proizvod RTK, čas vzpostavitve in trajanje povezave, število satelitov premičnega in referenčnega sprejemnika, referenčno postajo in oddaljenost od (glavne) referenčne postaje, latenco popravkov ter tip rešitve na premičnem sprejemniku. Položaj uporabnika je mogoče prikazati tudi na karti (slika 38). Celotna zgodovina vzpostavljenih povezav se shranjuje v dnevniške datoteke.

RTK Proxy Server omogoča uporabo poljubnih komunikacijskih kanalov, od interneta, serijskih modemov, do dostopovnih strežnikov (ang. Access Routers). Gosti enega ali več NTRIP Casterjev,



deluje pa lahko tudi kot NTRIP Server. RTK Proxy Server se iz varnostnih razlogov v okoljih IT navadno namesti v območje DMZ (Leica Geosystems, 2007).



Slika 38: Celovit prikaz uporabnikov storitev RTK, ki so trenutno povezani v omrežje GNSS.  
Figure 38: Comprehensive status information of RTK rovers currently logged in the GNSS network.

### GNSS Spider – Business Center (SBC)

Spider Business Center je rešitev za upravljanje z vsemi storitvami omrežja GNSS, uporabniki ter naročniki. Vgrajen je v okolje GNSS Spider in SpiderWeb.

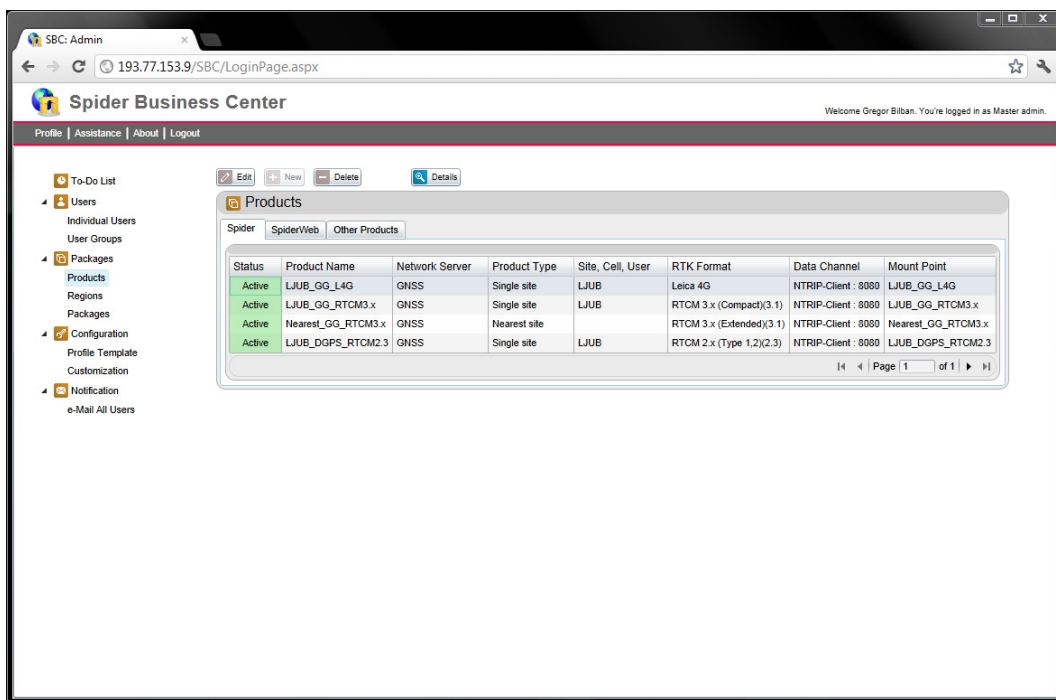
Osrednji strežnik SBC Central Server obdeluje in upravlja vse uporabniške nastavitve, prijave, dostope, overitve in odobritve. Vse nastavitve in podatke shranjuje v lastno podatkovno bazo SQL, zato mora biti na istem računalniku nameščen tudi SQL Server.

SBC Proxy Server je posrednik med osrednjim strežnikom SBC, Network Serverjem ter spletnima portaloma za uporabnike SBC Web Portal in SpiderWeb. Zasnovan je tako, da zadošča vsem varnostnim standardom v okoljih IT, kjer so vse povezave iz lokalnega omrežja proti internetu zavarovane s programskimi ali strojnimi požarnimi zidovi. Navadno se namesti v območje DMZ.

SBC Web Portal zagotavlja grafični uporabniški vmesnik za upravljanje Spider Business Centra. Do njega se dostopa s spletnim brskalnikom. Osrednjemu strežniku SBC posredujejo razpoložljive proizvode GNSS Spider Network Server in SpiderWeb. Upravljaavec omrežja v SBC iz različnih proizvodov oblikuje pakete storitev (tako realno-časovnih kot tudi storitve naknadnega prenosa podatkov ter spletne naknadne obdelave opazovanj), nastavlja pravice končnih uporabnikov in obračunava storitve (slika 39). Končni uporabniki pa imajo preko SBC Web Portala vpogled v zgodovino uporabe storitev, pregled nad stroški, prijavljanje na nove proizvode ali storitve omrežja, podaljševanje prijav ter nadzor nad lastnimi premičnimi sprejemniki (storitev sledenja).



SBC Web Portal se samodejno namesti skupaj s SBC Proxy Serverjem, na istem računalniku pa mora biti nameščen tudi spletni strežnik Microsoft Internet Information Server (IIS) s storitvami Web Management (Scripts and Tools).



Slika 39: Administratorski portal Spider Business Center za upravljanje z uporabniki, proizvodi in storitvami.  
Figure 39: Spider Business Center administrator's view allows users, products and services management.

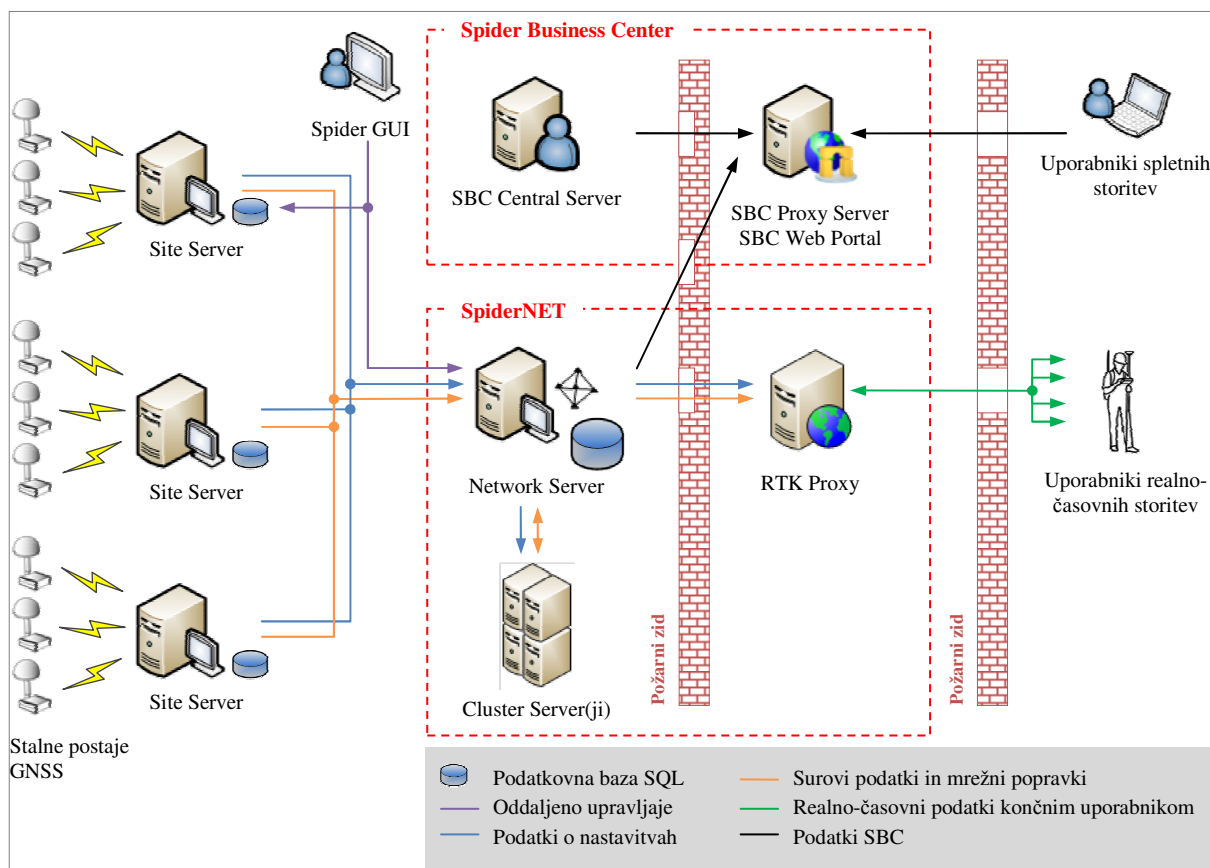
### GNSS Spider – SQL Database

Vse strežniške in odjemalske komponente sistema GNSS Spider dostopajo do podatkovne baze SQL (Microsoft SQL Server), preko katere si delijo podatke o nastavitvah za vse lokacije in sprejemnike, nastavitvah omrežja, proizvodih RTK, datotečnih proizvodih, stanju postaj in povezav.

Leica GNSS Spider ima vgrajena preprosta orodja za upravljanje s podatkovno bazo, ki omogočajo hitro in enostavno zavarovanje (ang. Backup) ali povrnitev (ang. Restore) vseh nastavitv sistema. Tako je mogoče kadar koli celotno omrežje GNSS povrniti v prejšnje stanje, enostavno pa se lahko konfiguracija sistema tudi preseli na drug računalnik. V hujših primerih izpada strežnika je tako lahko omrežje ponovno usposobljeno v najkrajšem možnem času in brez večjega napora za upravljalca omrežja.

### GNSS Spider – Data Dispatcher

Data Dispatcher je mehanizem, ki zagotavlja, da so vsi strežniki GNSS Spider ter vsi odjemalci, ki se povezujejo na strežnike, medsebojno sinhronizirani. To omogoča takojšnje razpošiljanje dogodkov (ang. Instant Event Distribution) ob vsakem opravilu, zato je vsaka sprememba takoj vidna vsem strežnikom in vsem povezanim odjemalcem. Data Dispatcher skrbi tudi za vso podatkovno komunikacijo in razpošiljanje surovih in mrežnih podatkov med posameznimi komponentami sistema GNSS Spider. Shemo podatkovnih povezav prikazuje slika 40.



Slika 40: Podatkovne povezave med posameznimi deli sistema Leica GNSS Spider. Povzeto in prirejeno po (Leica Geosystems, 2011).

Figure 40: Data flows between reference stations, users and Leica GNSS Spider server components. Adapted from (Leica Geosystems, 2011).

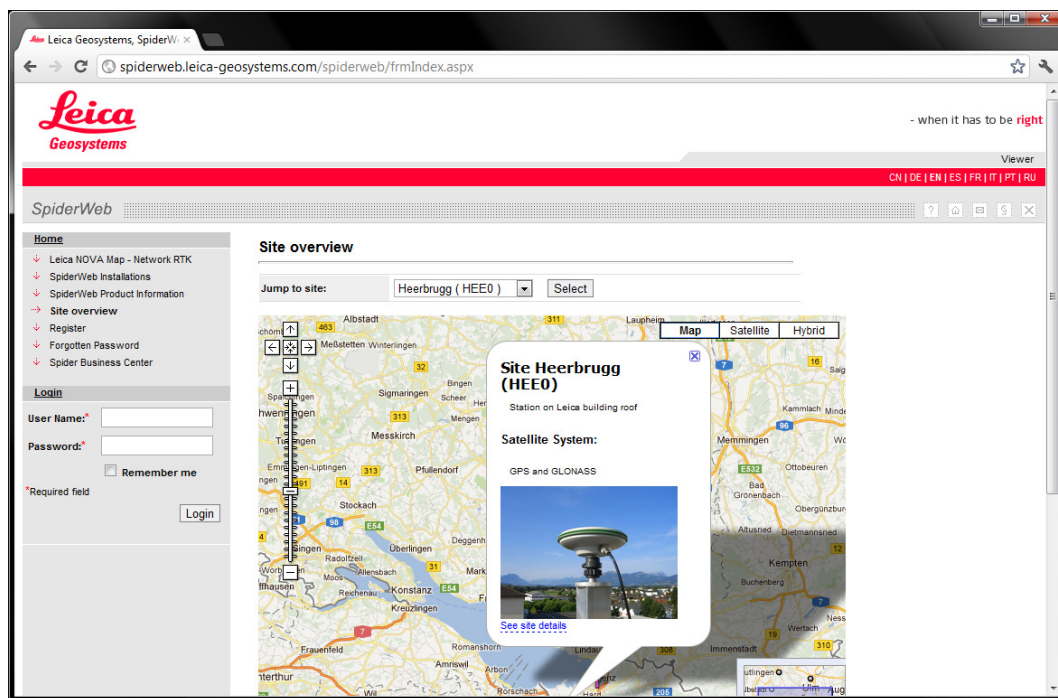
### SpiderWeb

Leica SpiderWeb je programska oprema za predstavitev omrežja GNSS na internetu (slika 41). Omogoča uporabniški pogled na omrežje (grafičen prikaz razporeditve referenčnih postaj, prikaz podatkov o postajah), učinkovit in varen dostop do podatkov za naknadno obdelavo opazovanj ter storitve z dodano vrednostjo, ki so uporabnikom na voljo preko spletnega portala:

- prenos surovih podatkov posameznih referenčnih postaj za potrebe naknadne obdelave opazovanj »RINEX Jobs Service«,
- prenos surovih podatkov za naknadno obdelavo z upoštevanjem omrežja GNSS (dejanska opazovanja najbližje referenčne postaje GNSS se popravi z upoštevanjem mrežnih popravkov celice glede na položaj uporabnika) »Virtual RINEX Service« ter

- spletna naknadna obdelava podatkov »Coordinate Computation Service«, pri kateri se uporablja jedro programa Leica Geo Office.

Kadar je na osrednjem računalniku nameščen Leica SpiderQC, omogoča SpiderWeb tudi prikaz razpoložljivosti in kakovosti podatkov postaj in delovanje omrežja (Leica Geosystems, 2010b).

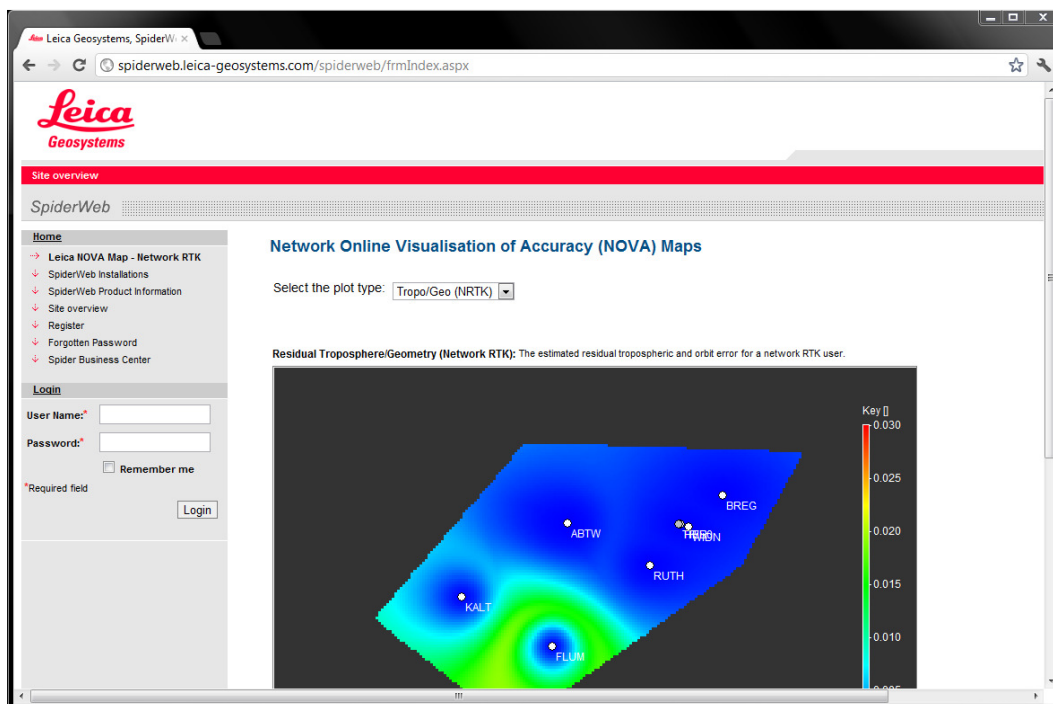


Slika 41: Spletni portal Leica SpiderWeb je orodje za predstavitev omrežja GNSS na internetu.

Figure 41: Leica SpiderWeb brings GNSS network to the internet.

### SpiderQC

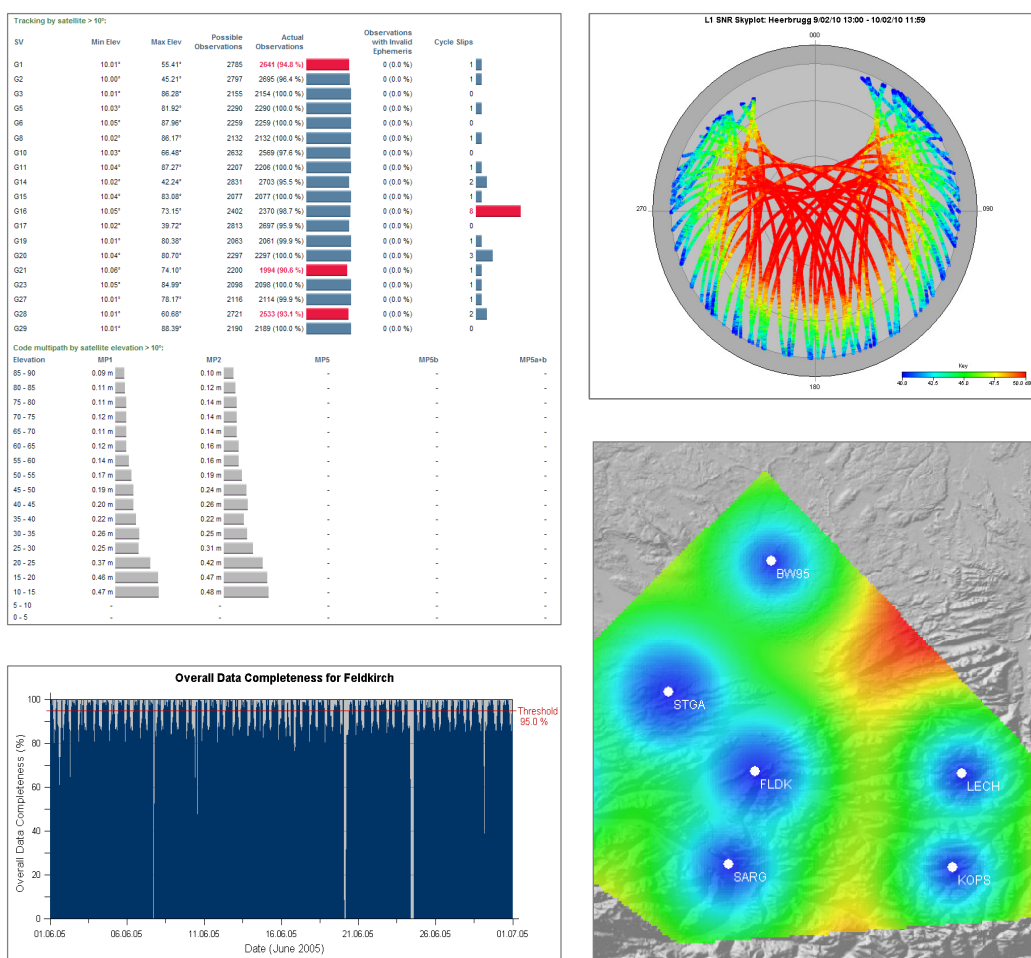
Leica SpiderQC je programska oprema za kontrolo kakovosti in analizo podatkov v omrežjih GNSS. Uporabna je tako v fazi izgradnje ali nadgradnje omrežja, v postopkih izbiranja najprimernejših lokacij za referenčne postaje, omogoča sprotno ugotavljanje kakovosti podatkov referenčnih postaj, grafično predstavitev zmogljivosti omrežja, kontrolo integritete omrežja kot tudi prikaz in ugotavljanje premikov ter alarmiranje. Vgrajeno ima podporo za sisteme GPS, GLONASS in Galileo. Omogoča neposredno vgradnjo v SpiderWeb za spletno predstavitev zmogljivosti omrežja, kakršne so na primer grafične karte natančnosti omrežja (ang. Network Online Visualisation of Accuracy Maps, NOVA Maps) (slika 42), in celovitosti podatkov za naknadno obdelavo (Leica Geosystems, 2010a).



Slika 42: Leica SpiderQC je lahko integriran v spletni portal SpiderWeb, kjer uporabnikom posreduje informacije o zmogljivosti omrežja.

*Figure 42: Leica SpiderQC can be integrated into SpiderWeb for fully automatic provision of quality information in the network.*

Kot samostojno orodje je SpiderQC odličen pokazatelj primernosti posamezne lokacije za postavitev referenčne postaje GNSS. Program po pregledu datotek RINEX prikaže skladnost podatkov s standardom (glava datoteke), celovitost podatkov in delež prekinitvev, primernost lokacije glede sprejema signalov, delež opazovanj z nizkim višinskim kotom, največje vrednosti DOP, najmanjši višinski kot sprejema signalov (ovire), prisotnost večpotja in razmerje signal/šum. Program omogoča tudi primerjavo med različnimi lokacijami. S pomočjo prikazov neba (ang. Skyplot), višinskih diagramov (ang. Elevation Plot) in časovnih diagramov omogoča odkrivanje motenj in interferenc, s tem pa tudi ugotavljanje težav zaradi izgub na kabljih, antenskih delilnikih, ojačevalnikih ali na prenapetostnih odvodnikih. Za ugotavljanje vplivov večpotja na opazovanja kode in faze na vseh frekvencah program izračuna povprečne vrednosti RMS za satelit, frekvenco in višinski kot in s tem omogoča ugotavljanje primernosti okolice referenčne postaje za visoko-kakovostna opazovanja GNSS.



Slika 43: Izpisi in grafični prikazi, ki jih samodejno pripravlja Leica SpiderQC, omogočajo nadzor nad kakovostjo delovanja referenčnih postaj in omrežij.

Figure 43: Leica SpiderQC automatically generates reports and plots which allow extensive quality control and performance analysis of GNSS reference stations and networks.

SpiderQC omogoča upravljavcu omrežja tudi analiziranje dnevniških datotek uporabnikov storitev RTK, ki jih ustvarja GNSS Spider Network Server. Splošno poročilo vsebuje število vzpostavljenih povezav RTK glede na uporabljen proizvod, število vzpostavljenih povezav po dnevih in po uporabnikih, skupen in povprečen čas vseh vzpostavljenih povezav, položaje posameznih premičnih sprejemnikov pa prikaže tudi na karti. Z analizo dnevniških datotek NMEA premičnih sprejemnikov GNSS prikaže še skupni in povprečni čas vzpostavljene povezave RTK, povprečen čas za inicializacijo ter delež povezav z uspešno inicializacijo.

Ker SpiderQC omogoča tudi sprejem sporočil NMEA ali neposreden dostop do podatkovne baze SQL z rezultati jedra za realno-časovno ali naknadno obdelavo GNSS Spider Positioning, ki je vgrajeno v strežnik Site Server, se ga lahko uporabi kot orodje za kontrolo integritete omrežja bodisi s stalnim roverjem (ena od referenčnih postaj, ki v omrežju deluje kot premični sprejemnik RTK) ali pa se uporabi eno od referenčnih postaj. Poleg grafičnega prikaza natančnosti, števila prejetih sporočil NMEA, deleža uspešno določenih položajev in povprečnega števila satelitov, je mogoče nastaviti tudi 3 tolerančne nivoje doseženih vrednosti ter obveščanje s sporočili SMS, elektronsko pošto ali s proženjem drugih programov (Leica Geosystems, 2012).

Dodana vrednost tako za upravljavca kot za uporabnike omrežja so karte NOVA, ki predstavljajo enega od pokazateljev zmogljivosti omrežja GNSS. To je grafičen prikaz preostalih ionosferskih in geometričnih (troposfera in orbita) vplivov v omrežju GNSS tako pri referenciranju z najbližje postaje kot z omrežja. Ocena preostalih vplivov se lahko določi sproti iz sporočil RTCM 3 1015, 1016 in 1017, zato je neodvisna od uporabljene programske opreme za upravljanje omrežij ter uporabljenih mrežnih konceptov. Empirično je bilo dokazano, da NOVA predstavlja dobro oceno natančnosti določitve položaja premičnega sprejemnika. Vendar pa se za njegovo določitev ne uporabljajo dejanska opazovanja premičnega sprejemnika GNSS, zato ne more predstavljati resničnih lokalnih vplivov na opazovanja (Brown, Alves, 2008).

Upravljavec omrežja GNSS s pomočjo kart NOVA lahko ugotavlja potencialne šibkosti v omrežju, na primer področja s prevelikimi oddaljenostmi med referenčnimi postajami ali področja s slabšo kakovostjo popravkov z najbližje postaje kot tudi mrežnih popravkov. Uporabniki premičnih sprejemnikov GNSS na terenu lahko izberejo najprimernejši način referenciranja glede na njihovo delovišče ter imajo obenem vpogled v delovanje in zmogljivosti omrežja, kar dviguje zaupanje v le-to.

### **3.5 Testne točke za izvedbo meritev**

#### **3.5.1 Izbira lokacij testnih točk**

Najpomembnejši kriterij pri izbiri testnih točk je bila oddaljenost do najbližje referenčne postaje GNSS, na kateri je nameščen sprejemnik, ki omogoča sledenje signalov GPS in GLONASS. Izbrane so bile tri tipične oddaljenosti od najbližje referenčne postaje (oziroma dolžine baznih vektorjev, če gre za določitev položaja z eno referenčno postajo):

- kratek bazni vektor (5 km),
- srednji bazni vektor (15 km), ki je hkrati zgornja meja dolžine baznega vektorja pri navezavi na najbližjo referenčno postajo GNSS, kot to določajo Navodila za izvajanje izmere z uporabo GNSS v državnem koordinatnem sistemu (Mozetič in sod., 2006), ter
- dolg bazni vektor (30 km), pri čemer je oddaljenost od vseh okoliških postaj približno enaka.

Vodilo pri izbiri je bilo, preveriti domnevo, da je pri kratkih baznih vektorjih (na primer nekaj kilometrov) kakovost določitve položaja pri navezavi na najbližjo referenčno postajo vsaj tako dobra kot pri uporabi mrežne rešitve. Vodilo pri izbiri dolgega baznega vektorja pa je bila simulacija razmer, kjer naj bi se potrdile prednosti mrežnih proizvodov RTK pred proizvodi z ene referenčne postaje, hkrati pa preverilo, ali navezava na najbližjo referenčno postajo v takšnih razmerah še lahko predstavlja »izhod v sili«, v primeru, da mrežna rešitev ni na voljo.





- Referenčne postaje GNSS
- Referenčne postaje GPS
- Referenčna postaja GNSS Geoservis
- Nedelujoče referenčne postaje
- Testne točke

Slika 44: Položaji testnih točk z označenimi najbližjimi referenčnimi postajami.

Figure 44: Locations of test points surrounded by nearest reference stations.

Naslednji kriteriji, ki so bili še upoštevani pri izbiri testnih točk, so še:

- obstoječa geodetska točka, ki je že stabilizirana (dogovarjanje z lastniki zemljišč, kjer se bodo opravljale terenske meritve, ponovljivost in preverljivost meritev),
- brez fizičnih ovir nad višinskim kotom 15° (za zagotovitev optimalnih pogojev za določitev položaja),
- okoliške referenčne postaje ne smejo biti robne točke omrežja (zaradi interpolacije sistematičnih vplivov na opazovanja po celotnem območju izvajanja meritev)
- ortometrična višina točk mora biti približno enaka višinam referenčnih postaj GNSS (v izogib negativnim vplivom troposfere),
- testne točke se nahajajo na trasi Velenje-Ljubljana (zaradi logistike, enostavnega dostopa z osebnim vozilom in porabe časa za vožnjo).

Za test so bile izbrane naslednje točke, ki najbolj ustrezajo omenjenim kriterijem:

- 10-3-445-Z0, Šentjakob (oddaljenost od referenčne postaje Ljubljana (GSR1) je 6.7 km),
- 5-5-90018-Z0, Šentvid pri Lukovici (oddaljenost od referenčne postaje Ljubljana (GSR1) je 16.7 km) in
- 20-3-77-Z0, Brdo nad Šmartnem ob Dreti (oddaljenost od referenčne postaje Ljubljana (GSR1) je 38.2 km, od referenčne postaje Slovenj Gradec (SLOG) pa je 28.2 km),

ki so prikazane na sliki 44.



Slika 45: Karta s prikazom razdalj med najbližjimi referenčnimi postajami.  
Figure 45: Map with nearest reference stations separations.

Stabilizacija in mikrolokacija točk je prikazana na slikah 46, 47 in 48.



Slika 46: Stabilizacija in mikrolokacija točke Šentjakob.  
Figure 46: Ground marker and micro-location of the point Šentjakob.





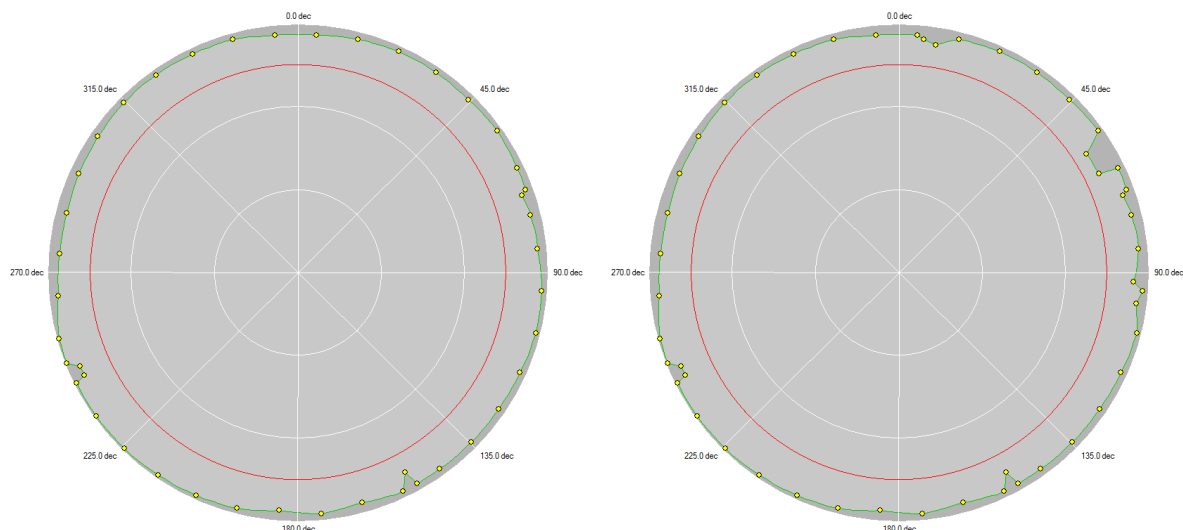
Slika 47: Stabilizacija in mikrolokacija točke Šentvid.  
*Figure 47: Ground marker and micro-location of the point Šentvid.*



Slika 48: Stabilizacija in mikrolokacija točke Brdo.  
*Figure 48: Ground marker and micro-location of the point Brdo.*

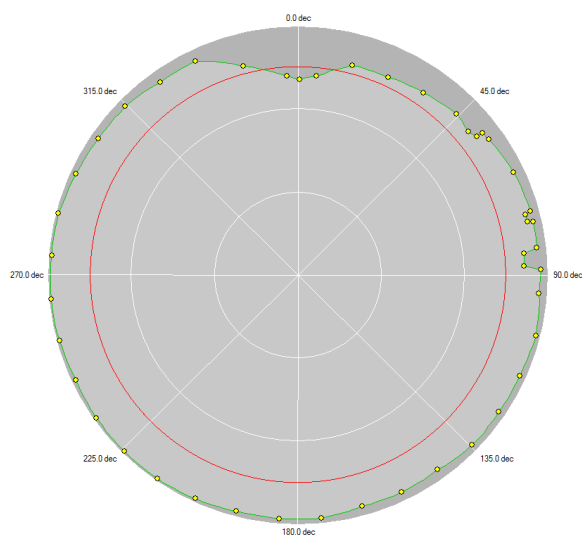
### 3.5.2 Ugotavljanje primernosti lokacij

Na vseh treh testnih točkah je bil s tahimetrom opravljen posnetek horizonta. V ta namen je bila z metodo izmere RTK-GNSS na vsaki lokaciji poleg testne točke določena še po ena geodetska točka za potrebe določitve orientacije tahimetra. Za grafično predstavitev horizonta (slike 49, 50 in 51) je bil uporabljen modul za planiranje opazovanj GNSS iz programa Leica Geo Office,. Na testnih točkah je bil horizont tudi fotografiran.



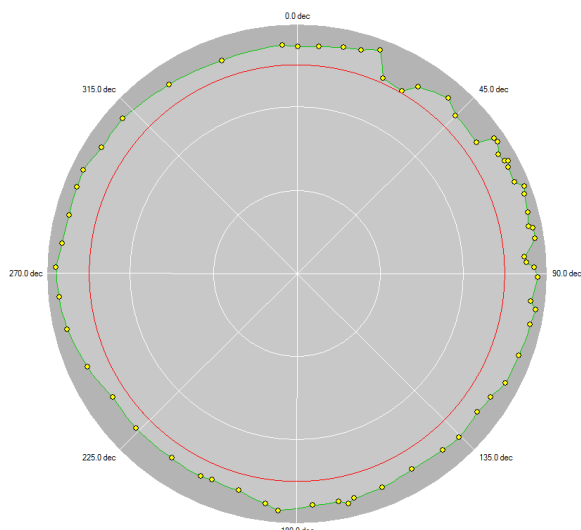
Slika 49: Višinski koti horizonta na točki Šentjakob (desno z vplivom daljnovoda v bližini). Rdeča črta predstavlja  $15^\circ$  višinski kot.

*Figure 49: Horizon elevation angle on the point Šentjakob. Plot on the right shows also the impact of nearby power lines. Red circle represents  $15^\circ$  elevation angle.*



Slika 50: Višinski koti horizonta na točki Šentvid

*Figure 50: Horizon elevation angle on the point Šentvid.*



Slika 51: Višinski koti horizonta na točki Brdo.

Figure 51: Horizon elevation angle on the point Brdo.

Za analizo primernosti lokacij je bila uporabljena programska oprema Leica SpiderQC. Na vsaki lokaciji je bila uporabljena po ena 24-urna serija opazovanja GNSS z intervalom shranjevanja 5 s. Preglednice in slike z rezultati analize kakovosti sledenja signalov GNSS so prikazane v nadaljevanju.

Preglednica 10: Analiza sledenja signalov na točki Šentjakob.

Table 10: Tracking analysis on the point Šentjakob.

#### Podatki o seriji opazovanj

Čas prvega opazovanja	16.09.2011, 05:29:00.00 GPS
Čas zadnjega opazovanja	17.09.2011, 06:01:10.00 GPS
Dolžina serije	24.54 h
Interval shranjevanja	5 s
Število satelitov z opazovanji	53

#### Splošni kazalniki kakovosti

Število epoh z opazovanji	17667 (100.0%)
Število epoh brez opazovanj	0 (0.0%)
Število epoh z <5 SV pri višinskem kotu >10°	0 (0.0%)
Število epoh z vsemi sateliti pri višinskem kotu >10°	17177 (97.2%)
Število epoh z vsemi opazovanji pri viš. kotu >10°	11539 (65.3%)
Število popolnih prekinitev signala (ang. Complete Loss of Lock)	0

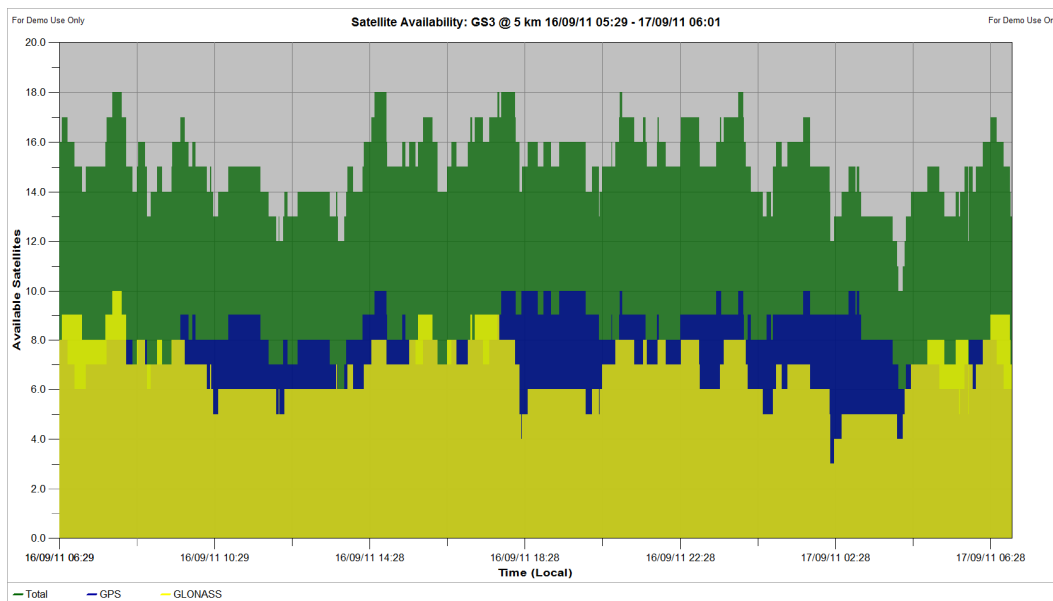
#### Geometrijska razporeditev satelitov

	Najmanjši	Največji	Srednji
PDOP	2.2	4.5	2.7
GDOP	2.6	5.2	3.2

#### Kazalniki kakovosti glede na GNSS

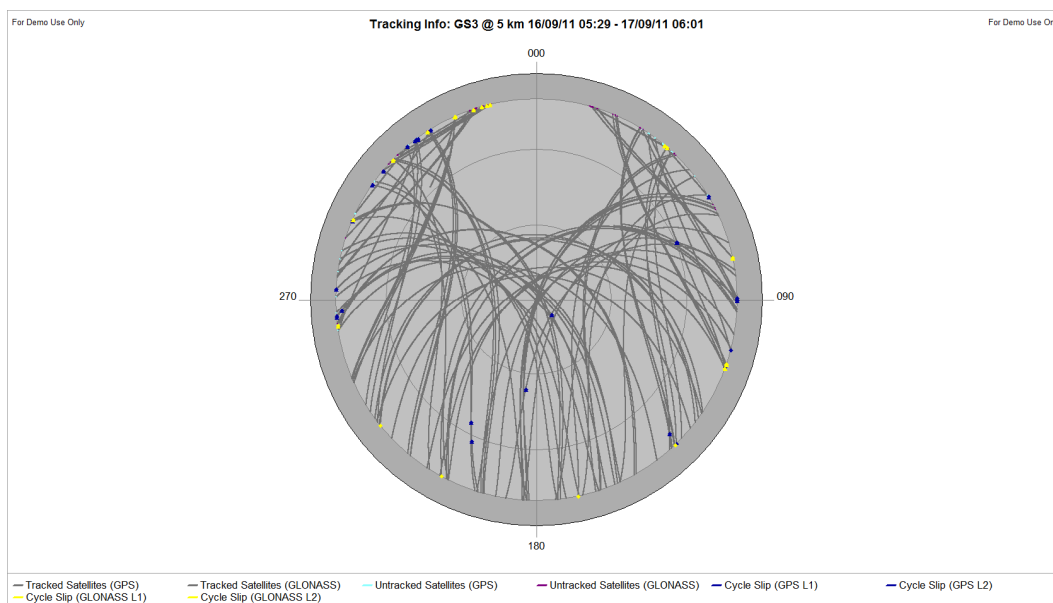
	Skupaj	GPS	GLONASS
Število vseh možnih opazovanj pri viš. kotu >10°	267087	144798	122289
Število opazovanj pri višinskem kotu >10°	266581	144605	121976
Delež opazovanj pri višinskem kotu >10°	99.8%	99.9%	99.7%
Število popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	260758	144564	116194
Delež popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	97.6%	99.8%	95.0%

Srednje število satelitov na epoho	15.1	8.2	6.9
Delež opazovanj L2 : L1	0.978	1.000	0.953
Število prekinitev pri višinskem kotu >10°	103	52	51
<b>Ocenjen vpliv večpotja na opazovanja kode</b>	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L1	0.171 m	0.164 m	0.180 m
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L2	0.232 m	0.224 m	0.243 m



Slika 52: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Šentjakob.

Figure 52: Satellite availability on the point Šentjakob.



Slika 53: Razpoložljivost signalov GNSS na točki Šentjakob.

Figure 53: Tracking information on the point Šentjakob.

Preglednica 11: Analiza sledenja signalov na točki Šentvid.

Table 11: Tracking analysis on the point Šentvid.

**Podatki o seriji opazovanj**

Čas prvega opazovanja	17.09.2011, 08:40:35.00 GPS
Čas zadnjega opazovanja	18.09.2011, 08:53:40.00 GPS
Dolžina serije	24.22 h
Interval shranjevanja	5 s
Število satelitov z opazovanji	53

**Splošni kazalniki kakovosti**

Število epoh z opazovanji	17438
Število epoh brez opazovanj	0
Število epoh z <5 SV pri višinskem kotu >10°	0 (0.0%)
Število epoh z vsemi sateliti pri višinskem kotu >10°	16906 (96.9%)
Število epoh z vsemi opazovanji pri viš. kotu >10°	12018 (68.9%)
Število popolnih prekinitev signala	0

**Geometrijska razporeditev satelitov**

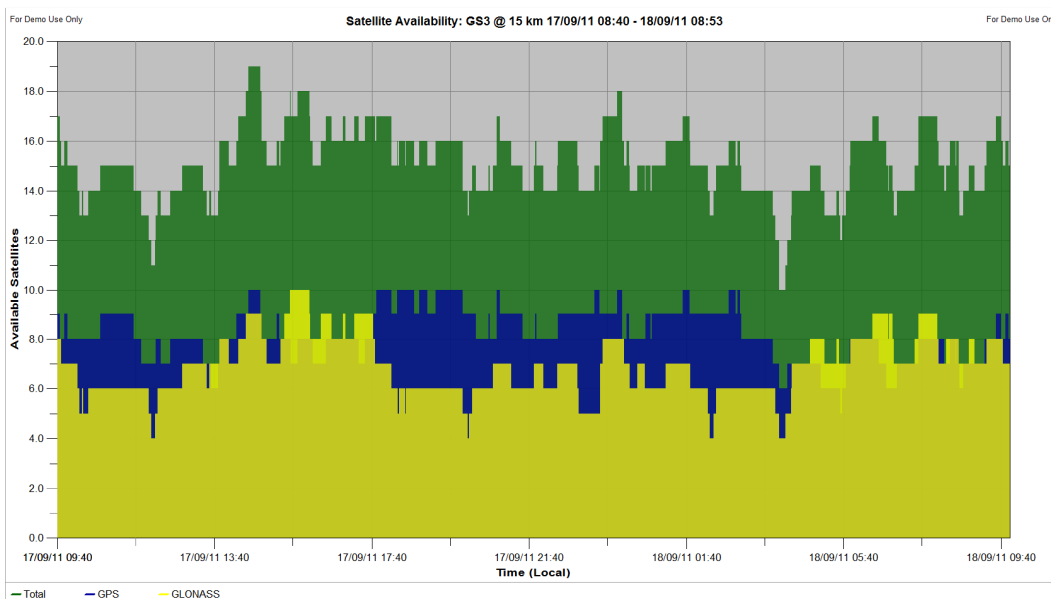
	<b>Najmanjši</b>	<b>Največji</b>	<b>Srednji</b>
PDOP	2.3	4.3	2.7
GDOP	2.7	5.3	3.2

**Kazalniki kakovosti glede na GNSS**

	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Število vseh možnih opazovanj pri viš. kotu >10°	264453	143461	120992
Število opazovanj pri višinskem kotu >10°	263913	143276	120637
Delež opazovanj pri višinskem kotu >10°	99.8%	99.9%	99.7%
Število popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	258863	143244	115619
Delež popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	97.9%	99.8%	95.6%
Srednje število satelitov na epoho	15.1	8.2	6.9
Delež opazovanj L2 : L1	0.981	1.000	0.958
Število prekinitev pri višinskem kotu >10°	113	45	68

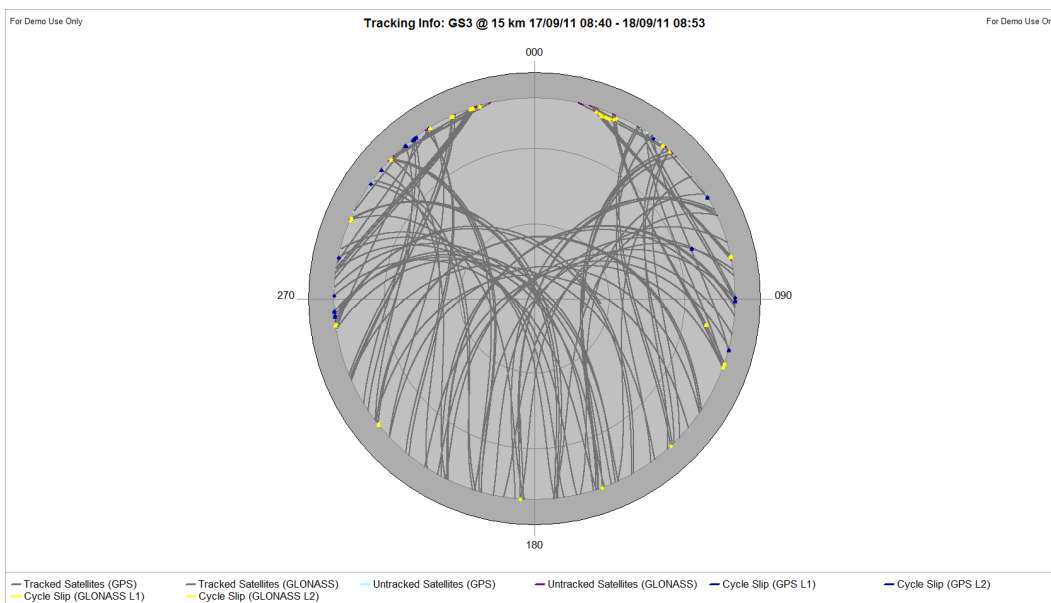
**Ocenjen vpliv večpotja na opazovanja kode**

	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L1	0.207 m	0.204 m	0.212 m
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L2	0.276 m	0.270 m	0.283 m



Slika 54: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Šentvid.

Figure 54: Satellite availability on the point Šentvid.



Slika 55: Razpoložljivost signalov GNSS na točki Šentvid.

Figure 55: Tracking information on the point Šentvid.

Preglednica 12: Analiza sledenja signalov na točki Brdo.

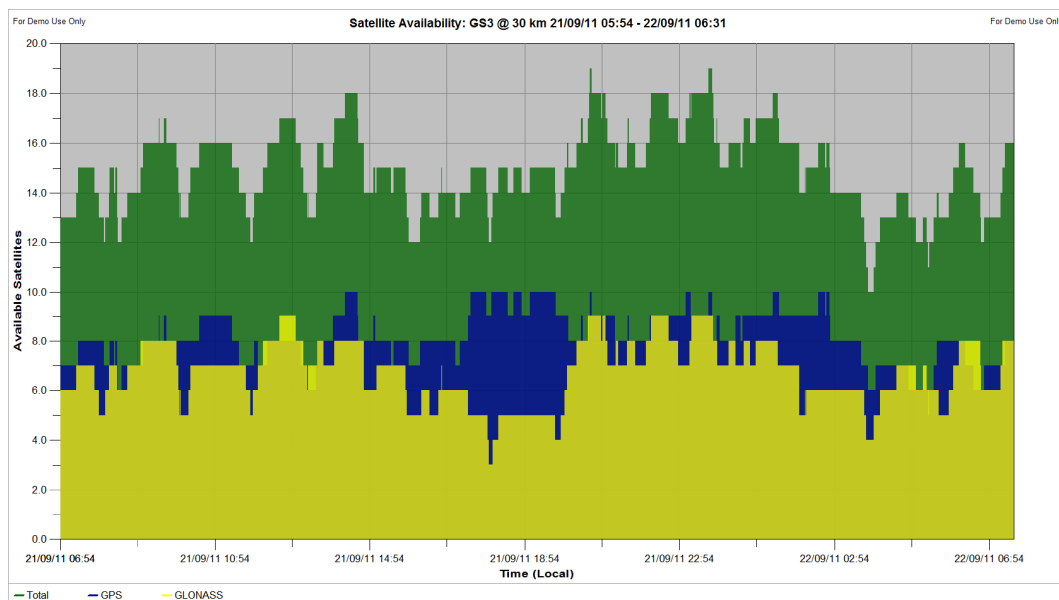
Table 12: Tracking analysis on the point Brdo.

### Podatki o seriji opazovanj

Čas prvega opazovanja	21.09.2011, 05:54:45.00 GPS
Čas zadnjega opazovanja	22.09.2011, 06:31:55.00 GPS
Dolžina serije	24.62 h
Interval shranjevanja	5 s
Število satelitov z opazovanji	53

### Splošni kazalniki kakovosti

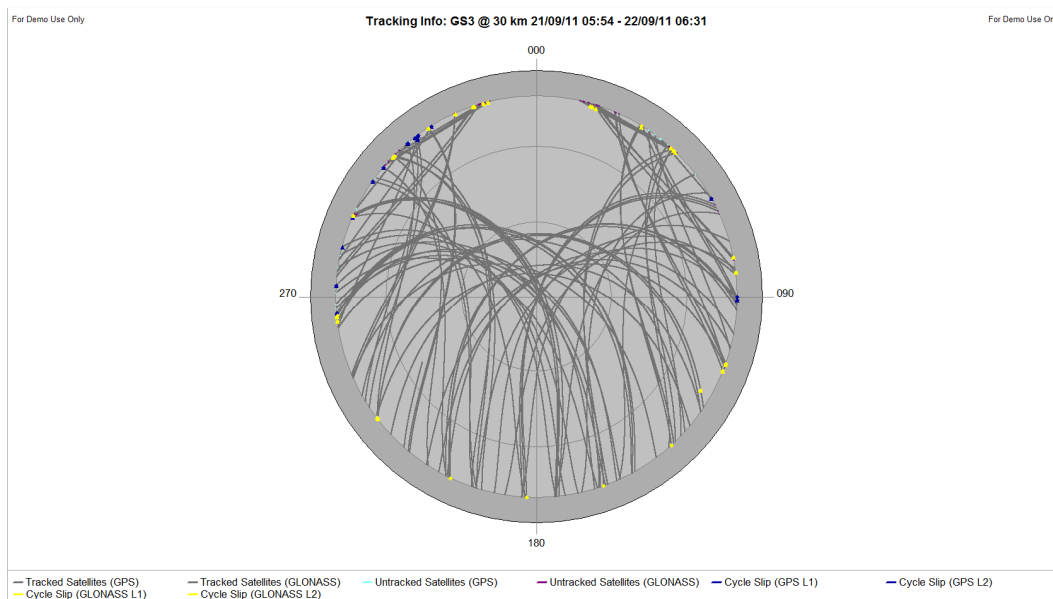
Število epoh z opazovanji	17727		
Število epoh brez opazovanj	0		
Število epoh z <5 SV pri višinskem kotu >10°	0 (0.0%)		
Število epoh z vsemi sateliti pri višinskem kotu >10°	17180 (96.9%)		
Število epoh z vsemi opazovanji pri viš. kotu >10°	11745 (66.3%)		
Število popolnih prekinitev signala	0		
<b>Geometrijska razporeditev satelitov</b>	<b>Najmanjši</b>	<b>Največji</b>	<b>Srednji</b>
PDOP	2.2	4.2	2.7
GDOP	2.6	5.2	3.3
<b>Kazalniki kakovosti glede na GNSS</b>	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Število vseh možnih opazovanj pri viš. kotu >10°	265559	145328	120231
Število opazovanj pri višinskem kotu >10°	264991	145137	119854
Delež opazovanj pri višinskem kotu >10°	99.8%	99.9%	99.7%
Število popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	259332	145098	114234
Delež popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	97.7%	99.8%	95.0%
Srednje število satelitov na epoho	14.9	8.2	6.8
Delež opazovanj L2 : L1	0.979	1.000	0.953
Število prekinitev pri višinskem kotu >10°	101	40	61
<b>Ocenjen vpliv večpotja na opazovanja kode</b>	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L1	0.185 m	0.189 m	0.179 m
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L2	0.254 m	0.257 m	0.249 m



Slika 56: Razpoložljivost satelitov GNSS na točki Brdo.

Figure 56: Satellite availability on the point Brdo.





Slika 57: Razpoložljivost signalov na točki Brdo.

Figure 57: Tracking information on the point Brdo.

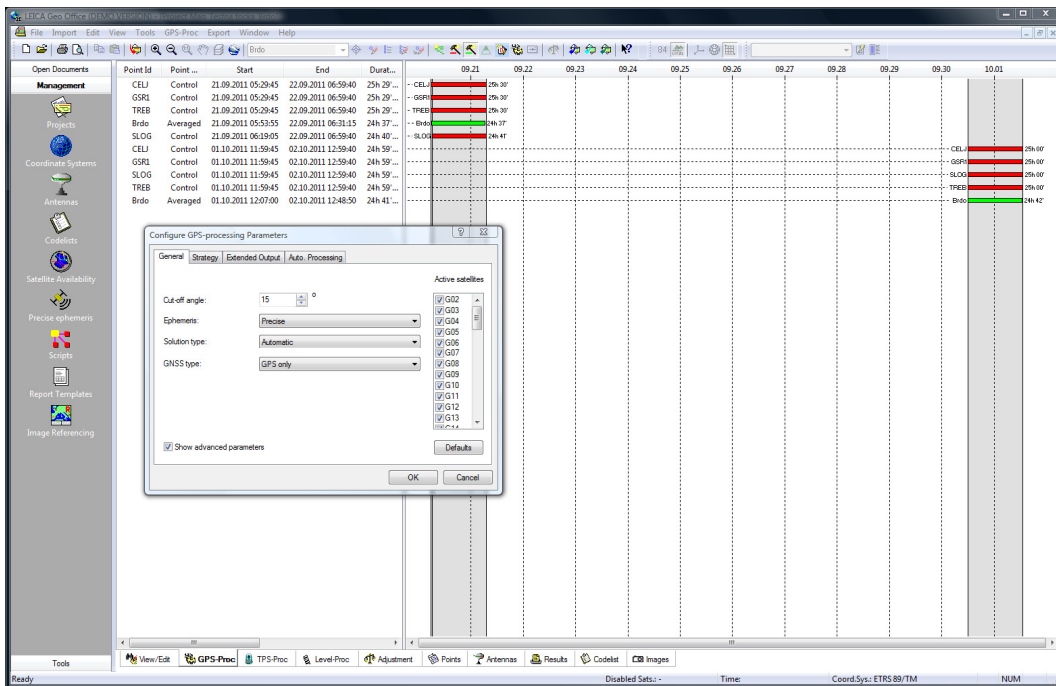
### 3.5.3 Določitev koordinat testnih točk

Koordinate testnih točk so bile določene na osnovi dveh 24-urnih serij opazovanj z intervalom shranjevanja 5 s. Med obema serijama je bila 9-dnevna prekinitev. Surova opazovanja za naknadno obdelavo so bila pridobljena iz datotek LB2, ki so se shranjevale na vseh sprejemnikih med izvedbo testov RTK. Za pretvorbo datotek LB2 v zapis RINEX je bila uporabljena namenska programska oprema proizvajalca ViewLB2. Uporabljena so bila opazovanja iz samo enega sprejemnika od štirih, vendar je bil v vsaki seriji izbran drug sprejemnik.

Koordinate novih točk so bile določene iz štirih najbližjih referenčnih postaj: Ljubljana (GSR1), Trebnje (TREB), Celje (CELJ) in Slovenj Gradec (SLOG). Uporabljene so bile končne precizne efemeride službe IGS, nastavljen višinski kot  $15^\circ$ , troposferski model Hopfield, ionosferski model in vrsta rešitve sta bila nastavljena na samodejno izbiro, uporabljena pa so bila samo opazovanja GPS.

Naknadna obdelava opazovanj je bila opravljena s programskim paketom Leica Geo Office različice 8.2 s procesnim jedrom PSI-Pro 3.0 (slika 58).

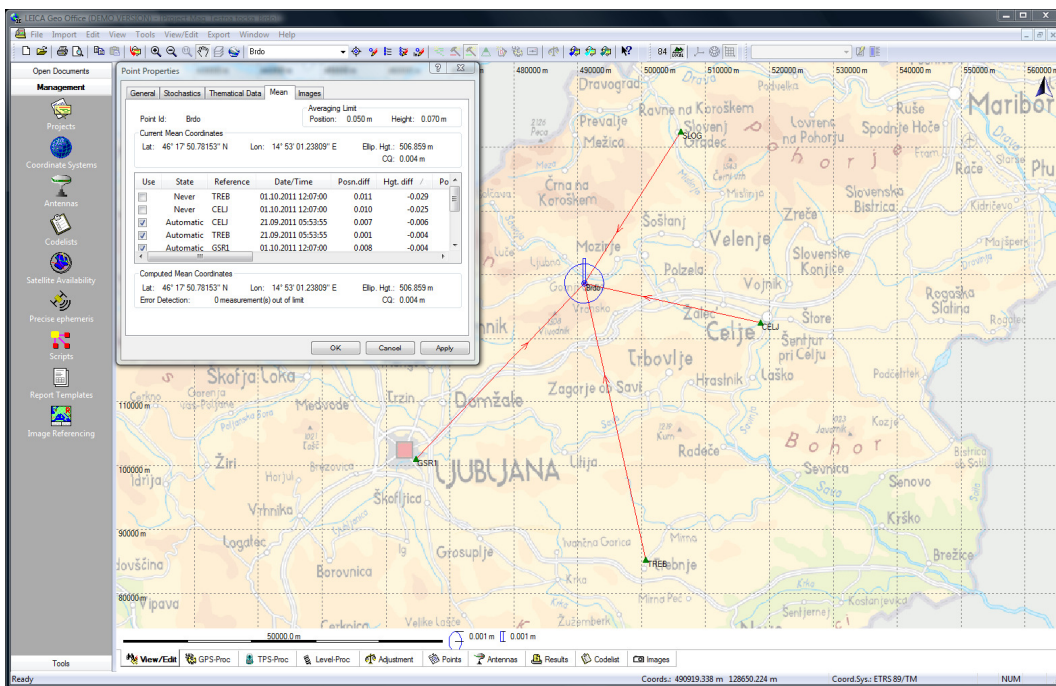




Slika 58: Naknadna obdelava opazovanj GNSS in določitev koordinat testnih točk je bila opravljena s programskim paketom Leica Geo Office.

Figure 58: Leica Geo Office software was used for post-processing and calculation of test points coordinates.

Za vsako novo točko je bilo tako izračunano 8 baznih vektorjev (4 dane točke  $\times$  2 seriji). Koordinate novih točk so bile določene kot utežena srednja vrednost (slika 59). Pri tem je bilo za izločanje baznih vektorjev uporabljeno preprosto pravilo, da se vektor odstrani iz določitve sredine, če je 3D-odstopanje koordinate od izračunane sredine večje od 0.020 m.



Slika 59: Prikaz izračunanih baznih vektorjev za testno točko Brdo.

Figure 59: Baselines used in determination of final coordinates of the point Brdo.

Koordinate novih točk, ki so navedene v preglednicah 13, 14 in 15, so podane v koordinatnem sistemu D96/TM in so bile v analizi kakovosti določitve položaja v omrežjih GNSS privzete kot prave. Ortometrična višina je bila pridobljena z uporabo absolutnega modela geoida »Pribičević, 2000«. V analizah je bila uporabljena elipsoidna višina nad elipsoidom GRS-80.

Preglednica 13: Koordinate in ocena natančnosti točke Šentjakob ter odstopanja baznih vektorjev.

Table 13: Final coordinates and quality estimates of the point Šentjakob.

<b>E</b>	468672.591 m
<b>N</b>	106397.598 m
<b>H</b>	283.917 m
<b>h<sub>WGS-84</sub></b>	330.371 m
<b>SD<sub>E</sub></b>	0.002 m
<b>SD<sub>N</sub></b>	0.001 m
<b>SD<sub>h</sub></b>	0.003 m
<b>3D CQ</b>	0.004 m

**Izračun sredine:**

	<b>Ref. točka</b>	<b>Datum</b>	<b>Odst. položaj</b>	<b>Odst. višina</b>	<b>Odst. 3D</b>
✓	TREB	16.09.2011, 05:27:35	0.006 m	-0.003 m	0.006 m
✓	SLOG	16.09.2011, 05:27:35	0.013 m	0.014 m	0.019 m
✓	GSR1	16.09.2011, 05:27:35	0.004 m	0.004 m	0.006 m
✓	CELJ	16.09.2011, 05:27:35	0.009 m	-0.009 m	0.012 m
✓	CELJ	26.09.2011, 05:54:05	0.009 m	-0.012 m	0.015 m
✗	SLOG	26.09.2011, 05:54:05	0.018 m	0.018 m	<b>0.025 m</b>
✓	GSR1	26.09.2011, 05:54:05	0.004 m	-0.001 m	0.004 m
✗	TREB	26.09.2011, 05:54:05	0.013 m	-0.023 m	<b>0.027 m</b>

Preglednica 14: Koordinate in ocena natančnosti točke Šentvid ter odstopanja baznih vektorjev.

Table 14: Final coordinates and quality estimates of the point Šentvid.

<b>E</b>	475011.346 m
<b>N</b>	114136.466 m
<b>H</b>	347.614 m
<b>h<sub>WGS-84</sub></b>	394.323 m
<b>SD<sub>E</sub></b>	0.002 m
<b>SD<sub>N</sub></b>	0.002 m
<b>SD<sub>h</sub></b>	0.003 m
<b>3D CQ</b>	0.004 m

**Izračun sredine:**

	<b>Ref. točka</b>	<b>Datum</b>	<b>Odst. položaj</b>	<b>Odst. višina</b>	<b>Odst. 3D</b>
✗	TREB	17.09.2011, 08:41:10	0.007	-0.023	<b>0.024</b>
✗	SLOG	17.09.2011, 08:41:10	0.012	0.027	<b>0.030</b>
✓	GSR1	17.09.2011, 08:41:10	0.007	-0.003	0.008
✓	CELJ	17.09.2011, 08:41:10	0.006	-0.011	0.013
✓	TREB	27.09.2011, 08:42:05	0.005	0.004	0.007
✗	SLOG	27.09.2011, 08:42:05	0.005	0.034	<b>0.034</b>
✓	GSR1	27.09.2011, 08:42:05	0.004	0.004	0.005

✓ CELJ 27.09.2011, 08:42:05 0.004 0.006 0.007

Preglednica 15: Koordinate in ocena natančnosti točke Brdo ter odstopanja baznih vektorjev.

Table 15: Final coordinates and quality estimates of the point Brdo.

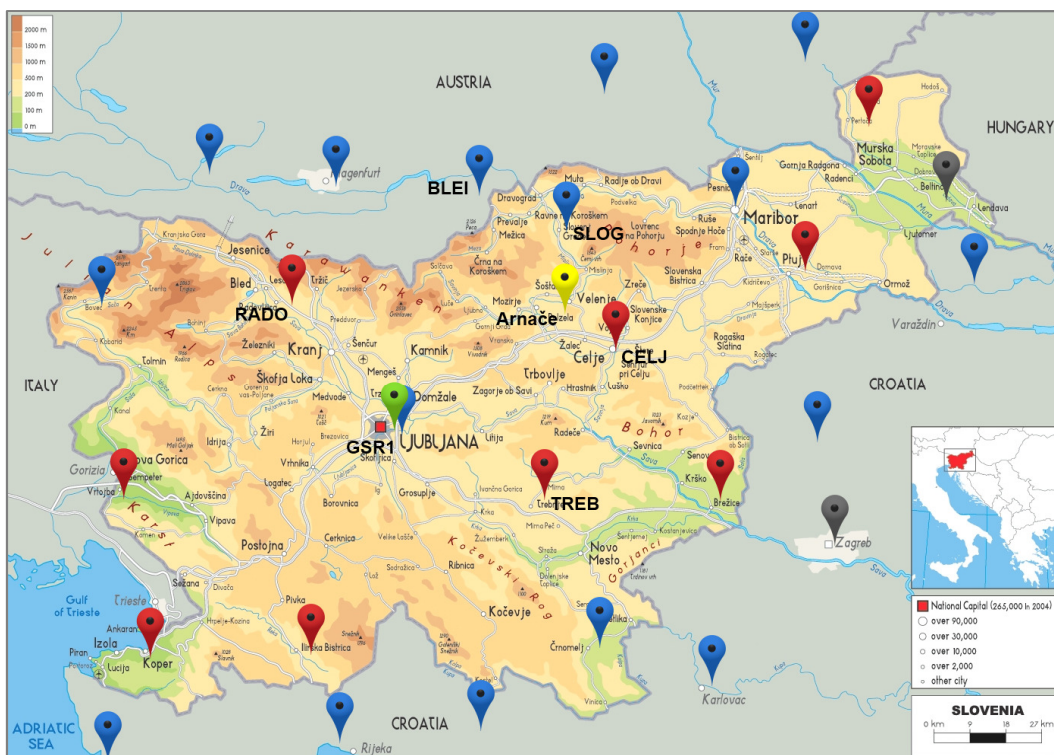
**E** 491038.557 m  
**N** 128641.224 m  
**H** 459.720 m  
**h<sub>WGS-84</sub>** 506.859 m  
**SD<sub>E</sub>** 0.002 m  
**SD<sub>N</sub>** 0.002 m  
**SD<sub>h</sub>** 0.002 m  
**3D CQ** 0.004 m






**Izračun sredine:**

	<b>Ref. točka</b>	<b>Datum</b>	<b>Odst. položaj</b>	<b>Odst. višina</b>	<b>Odst. 3D</b>
✓	TREB	21.09.2011, 05:53:55	0.001	-0.004	0.004
✓	GSR1	21.09.2011, 05:53:55	0.004	0.000	0.004
✓	CELJ	21.09.2011, 05:53:55	0.007	-0.006	0.009
✓	SLOG	21.09.2011, 06:19:05	0.004	0.008	0.009
✗	TREB	01.10.2011, 12:07:00	0.011	-0.029	<b>0.032</b>
✓	SLOG	01.10.2011, 12:07:00	0.011	0.007	0.013
✓	GSR1	01.10.2011, 12:07:00	0.008	-0.004	0.009
✗	CELJ	01.10.2011, 12:07:00	0.010	-0.025	<b>0.027</b>

### 3.5.4 Izbira in določitev koordinat testne točke Arnače

Za potrebe testa vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja je bila stabilizirana točka v Arnačah pri Velenju (slika 60). Edina parametra za izbiro točke sta bila bližina doma in primernost za izvajanje opazovanj GNSS. V smeri severa in severo-vzhoda od testne točke je sicer gozd z visokim drevjem, v smeri proti zahodu stanovanjski objekt, sicer pa je točka na blagem južnem pobočju in ima zato popolnoma odprto južno polovico neba. Od najbližjih referenčnih postaj je točka Arnače oddaljena 15 km (Celje) in 19 km (Slovenj Gradec).



-  Referenčne postaje GNSS
-  Referenčne postaje GPS
-  Referenčna postaja GNSS Geoservis
-  Nedelujoče referenčne postaje
-  Testna točka

Slika 60: Položaj testne točke Arnače.

Figure 60: Location of test point Arnače.





Slika 61: Merska oprema med izvedbo meritev na testni točki Arnače.

*Figure 61: Surveying equipment during the field test on the point Arnače.*

Za potrebe določitve koordinat testne točke so bile opravljene štiri serije 12-urnih stacionarnih meritev v štirih zaporednih dneh. Datoteke LB2 so bile za potrebe naknadne obdelave opazovanj pretvorjene v zapis RINEX. Opazovanja iz ene 12-urne serije so bila uporabljena tudi za analizo lokacije s programsko opremo Leica SpiderQC. Preglednice in slike z rezultati analize kakovosti sledenja signalov GNSS so prikazane v nadaljevanju.

Preglednica 16: Analiza sledenja signalov na točki Arnače.

*Table 16: Tracking analysis on the point Arnače.*

#### Podatki o seriji opazovanj

Čas prvega opazovanja	13.12.2011, 05:58:05.00 GPS
Čas zadnjega opazovanja	13.12.2011, 18:18:40.00 GPS
Dolžina serije	12.34 h
Interval shranjevanja	5 s
Število satelitov z opazovanji	48

#### Splošni kazalniki kakovosti

Število epoh z opazovanji	8888 (100.0%)
Število epoh brez opazovanj	0 (0.0%)
Število epoh z <5 SV pri višinskem kotu >10°	0 (0.0%)
Število epoh z vsemi sateliti pri višinskem kotu >10°	881 (9.9%)
Število epoh z vsemi opazovanji pri viš. kotu >10°	754 (8.5%)
Število popolnih prekinitev signala	0

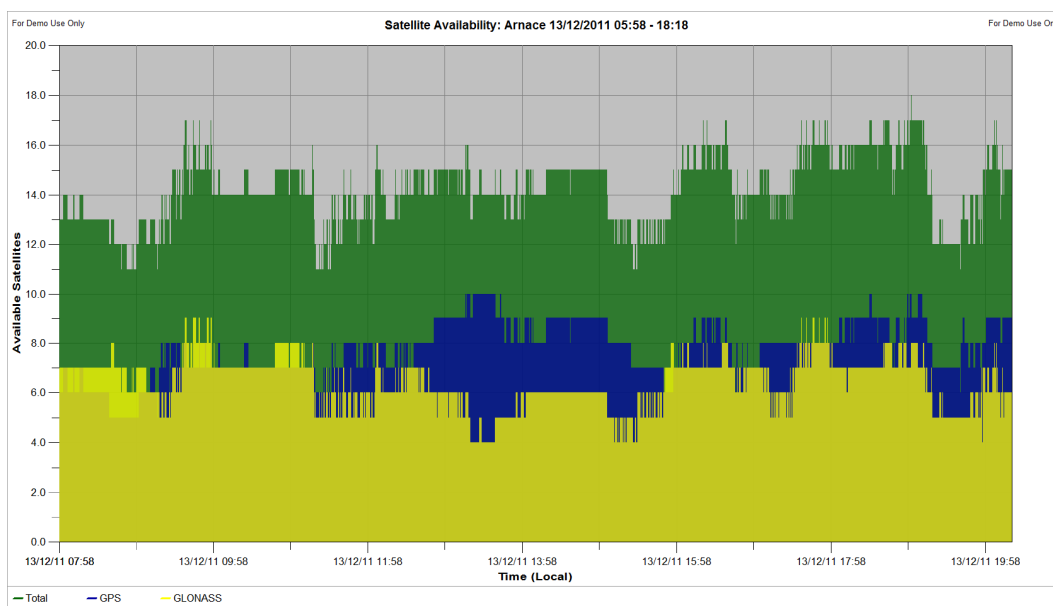
#### Geometrijska razporeditev satelitov

	Najmanjši	Največji	Srednji
--	-----------	----------	---------

PDOP	2.2	5.6	2.9
------	-----	-----	-----

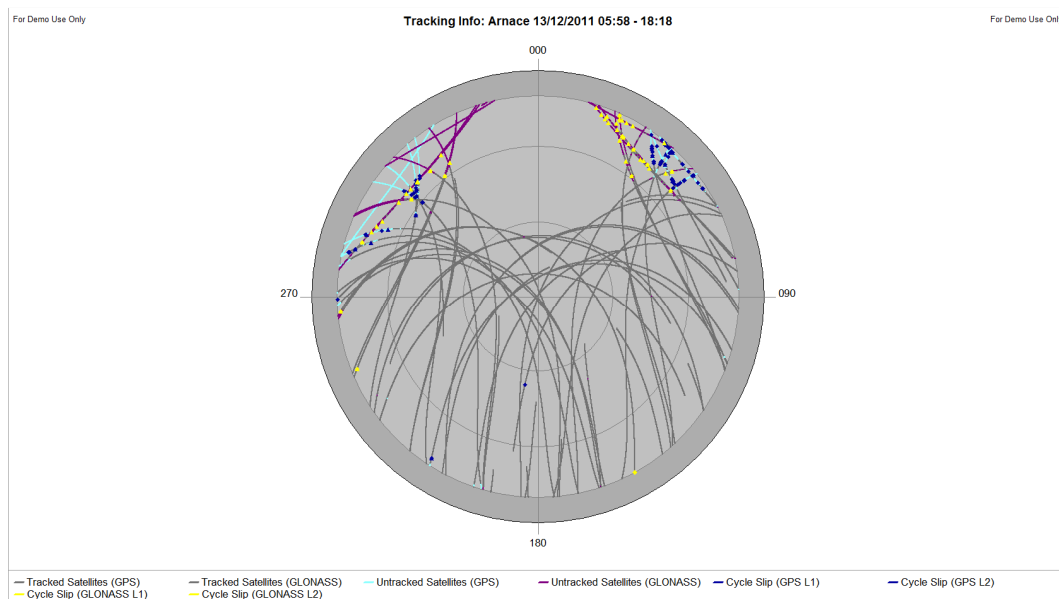
GDOP	2.6	7.1	3.5
<b>Kazalniki kakovosti glede na GNSS</b>	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Število vseh možnih opazovanj pri viš. kotu >10°	140563	74571	65992
Število opazovanj pri višinskem kotu >10°	126273	68965	57308
Delež opazovanj pri višinskem kotu >10°	89.8%	92.5%	86.8%
Število popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	124320	68519	55801
Delež popolnih opazovanj pri višinskem kotu >10°	88.4%	91.9%	84.6%
Srednje število satelitov na epoho	14.2	7.8	6.4
Delež opazovanj L2 : L1	0.985	0.994	0.974
Število prekinitev pri višinskem kotu >10°	333	179	154
<b>Ocenjen vpliv večpotja na opazovanja kode</b>	<b>Skupaj</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L1	0.352 m	0.271 m	0.449 m
Srednja vrednost RMS po vseh satelitih na L2	0.425 m	0.341 m	0.524 m

Testna točka Arnače izkazuje slabše pogoje za izvedbo meritev GNSS v primerjavi z ostalimi tremi testnimi točkami (manjkajo opazovanja, prisotne prekinitve in večpotje v primeru GLONASS), vendar kot takšna predstavlja običajne in pogoste razmere na terenu.



Slika 62: Razpoložljivost satelitov na točki Arnače.

Figure 62: Satellite availability on the point Arnače.



Slika 63: Razpoložljivost signalov na točki Arnace.

Figure 63: Tracking information on the point Arnace.

Koordinate testne točke Arnace so bile določene po enakem scenariju kot za ostale tri točke. Podane so v koordinatnem sistemu D96/TM (preglednica 17). Ortometrična višina je bila pridobljena z uporabo absolutnega modela geoida »Pribičević, 2000«. V analizah je bila uporabljena elipsoidna višina nad elipsoidom GRS-80.

Preglednica 17: Koordinate in ocena natančnosti točke Arnace ter odstopanja baznih vektorjev.

Table 17: Final coordinates and quality estimates of the point Arnace.

<b>E</b>	508486.236 m
<b>N</b>	133192.989 m
<b>H</b>	393.021 m
<b>h<sub>WGS-84</sub></b>	439.919 m
<b>SD<sub>E</sub></b>	0.002 m
<b>SD<sub>N</sub></b>	0.001 m
<b>SD<sub>h</sub></b>	0.002 m
<b>3D CQ</b>	0.003 m

**Izračun sredine:**

	<b>Ref. točka</b>	<b>Datum</b>	<b>Odst. položaj</b>	<b>Odst. višina</b>	<b>Odst. 3D</b>
✓	TREB	10.12.2011, 05:43:40	0.004	0.001	0.004
✓	SLOG	10.12.2011, 05:43:40	0.009	-0.010	0.013
✓	GSR1	10.12.2011, 05:43:40	0.007	0.007	0.010
✗	CELJ	10.12.2011, 05:43:40	0.013	-0.025	<b>0.028</b>
✓	TREB	11.12.2011, 05:43:30	0.001	0.007	0.007
✓	SLOG	11.12.2011, 05:43:30	0.009	-0.003	0.009
✓	GSR1	11.12.2011, 05:43:30	0.004	0.008	0.009
✗	CELJ	11.12.2011, 05:43:30	0.016	-0.024	<b>0.029</b>
✓	TREB	12.12.2011, 06:00:20	0.001	-0.004	0.004
✓	SLOG	12.12.2011, 06:00:20	0.007	-0.015	0.017

✓	GSR1	12.12.2011, 06:00:20	0.004	0.001	0.004
✗	CELJ	12.12.2011, 06:00:20	0.015	-0.032	0.035
✓	TREB	13.12.2011, 05:57:50	0.014	0.000	0.014
✓	SLOG	13.12.2011, 05:57:50	0.009	0.000	0.009
✓	GSR1	13.12.2011, 05:57:50	0.011	0.005	0.012
✗	CELJ	13.12.2011, 05:57:50	0.016	-0.030	0.034

### 3.6 Ekonomski vidiki opravljenih terenskih meritev

Za osnovni vtis o kompleksnosti zastavljene naloge so v preglednici 18 ocenjeni glavni stroški in vrednosti uporabljene programske in merske opreme. Ocena vrednosti uporabljene merske opreme temelji na priporočenih cenah proizvajalca, ki se lahko razlikujejo od dejanske vrednosti opreme na različnih trgih.

Preglednica 18: Ocena vrednosti opreme in komunikacije za izvedbo terenskih meritev.

Table 18: List-price estimate of equipment and communication used.

Opis	Kom	Vrednost (EUR)
<b>Računalniška oprema</b>		
Strežnik Lenovo ThinkStation E20 X3450	1	
- <b>Skupaj računalniška oprema (EUR)</b>		<b>870.00</b>
<b>Programska oprema</b>		
Leica GNSS Spider programski paket in splošna licenca. Omogoča nastavitve in pregled stanja sprejemnikov, ročen prenos podatkov in nadgrajevanje sistemske programske opreme.	1	
Spider File Product Service (FPS). Omogoča samodejen prenos podatkov in pretvorbo v zapis RINEX, kontrolo kakovosti, beleženje dogodkov, prenos FTP in razpošiljanje podatkov preko interneta. Vključuje licenco za eno referenčno postajo/en sprejemnik.	1	
Licenca za dodatne referenčne postaje/sprejemnike, ki bodo uporabljeni s Spider File Product Service.	29	
SpiderNET, možnost za mrežni GPS RTK. Omogoča skupno obdelavo celotnega omrežja referenčnih postaj ter mrežno analizo. Vključuje licenco za 5 referenčnih postaj/sprejemnikov.	1	
Licenca za dodatne referenčne postaje/sprejemnike, ki bodo uporabljeni s SpiderNET.	25	
SpiderNET, razširitev za vključitev opazovanj GLONASS v mrežno analizo.	1	
SpiderNET, razširitev za vključitev mrežnih konceptov VRS, FKP	1	
Spider Advanced RT-Proxy Service. Vključuje funkcionalnosti NTRIP Caster. Omogoča napredne možnosti razpošiljanja proizvodov RTK, vključno s samodejno izbiro najbližje postaje in optimalne celice.	1	
Leica SpiderQC programski paket.	1	
- <b>Skupaj programska oprema (EUR)</b>		<b>234170.00</b>



<b>Merska oprema</b>		
Leica GS10 Professional sprejemnik GNSS	4	
Leica AS10 antena	1	
GEV141 antenski kabel 1.2 m	4	
GEV119 antenski kabel 10 m	1	
Leica CS10 terenski kontroler	3	
Leica CS15 terenski kontroler	1	
SmartWorx Viva CS licenca	4	
GFU24 GSM/GPRS komunikacijski modul	4	
GAT15 GSM antena	4	
GEB211 baterija za terenski kontroler	4	
GEB212 baterija za sprejemnik GNSS	8	
GEV97 napajalni kabel za povezavo zunanje baterije	8	
MSD1000 pomnilniška kartica SD, 1GB	4	
GST120-9 stativ, masiven lesen	1	
GDF122 podnožje z optičnim grezilom	1	
GRT144 nosilec antene	1	
GZS4 kljuka za merjenje višine antene GNSS	1	
GPS Networking ALDCBS1X4 antenski delilnik	1	
- <b>Skupaj merska oprema (EUR)</b>		<b>158445.00</b>
<b>Komunikacija</b>		
Mobitel Telemetrija, DGPS	4	
SIMPLnet paket	1	
SIMPLnet 24 ur/1 dan	5	
- <b>Skupaj komunikacija (EUR)</b>		<b>470.00</b>
- <b>SKUPAJ (EUR)</b>		<b>393955.00</b>

Zastavljena naloga je predpostavljala izvedbo sedmih 24-urnih meritev na treh različnih lokacijah. Zaradi različnih težav (prekinitve podatkovnih tokov z referenčnih postaj, izpad strežnika RTK in podobno) je bilo treba določene meritve ponoviti, tako da je bilo skupaj opravljenih enajst 24-urnih meritev.

Za vsako lokacijo je bil opravljen vsaj en predhodni ogled terena, en obisk lokacije za potrebe določitve horizonta ter po dva obiska (na lokaciji Brdo trije) za potrebe izvedbe terenskih meritev. Čeprav so se določene meritve izvajale na istih točkah več dni zapored, so bile pri izračunu opravljenih poti vedno upoštevane celotne trase »Arnače-testna točka-Arnače«, zato da so v oceno opravljenih poti približno vključeni tudi servisni kilometri (na primer dostava hrane). Na lokaciji Šentjakob je bilo opravljenih pet obiskov, na lokaciji Šentvid štiri obiski in na lokaciji Brdo 8 obiskov. Ocena števila opravljenih kilometrov je podana v preglednici 19.

Preglednica 19: Ocena števila opravljenih kilometrov.

Table 19: Mileage estimation.

<b>Relacija</b>	<b>km</b>	<b>Obiskov</b>	<b>Skupaj</b>
Arnače-Šentjakob-Arnače	148	5	740
Arnače-Šentvid-Arnače	126	4	504
Arnače-Brdo-Arnače	62	8	496
- <b>Skupaj prevoženo (km)</b>			<b>1740</b>

Za potrebe izvedbe naloge so bili pridobljeni podatki državnega omrežja referenčnih postaj GNSS SIGNAL, zagotovljena stalna internetna povezava s podatkovnim centrom omrežja na Geodetskem inštitutu Slovenije ter pridobljena dovoljenja lastnikov tujih omrežij (hrvaške Državne geodetske uprave, avstrijske Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen ter madžarske Földmérési és Távérzékelési Intézet). Dodatno je upravitelj omrežja SIGNAL pridobil še 25 začasnih licenc »Single Station« za NTRIP Caster pri dobavitelju programske opreme Trimble, ki je nameščena v centru Službe za GPS omrežja SIGNAL.

--- Ta stran je namenoma prazna ---

## 4 RAZISKAVA

### 4.1 Namen praktičnega dela

Namen praktičnega dela je bil vzpostaviti podatkovni center, praktično izvesti omrežje GNSS s programskim paketom Leica GNSS Spider, ki je bilo v največji možni meri podobno državnemu omrežju referenčnih postaj SIGNAL, in pridobiti izkušnje pri vzpostavljanju, upravljanju in vzdrževanju omrežij GNSS. Različni proizvodi RTK tako izvedenega omrežja ter omrežja SIGNAL so nato služili za preizkus različnih proizvodov RTK pri različnih oddaljenostih od najbližje referenčne postaje in s tem ugotavljanje primernosti za izvajanje meritev z metodo izmere RTK-GNSS. Pri tem se je ocenjevala:

- natančnost določitve položaja,
- točnost določitve položaja,
- število fazno določenih položajev (inicializacij) ter povprečen čas za inicializacijo,
- število in delež grobo pogrešenih meritev,
- število satelitov, vključenih v določitev položaja,
- vrednosti DOP ter
- količina prenesenih popravkov RTK iz omrežja.



Slika 64: Avtor naloge med izvedbo terenskih meritev na testni točki Šentjakob.

*Figure 64: Author during field work on the test point Šentjakob.*

Dodatni namen naloge je bil še preizkus vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja, ki je bil opravljen na testni točki Arnače.

Terenske meritve so se izvajale med 07.09.2011 in 05.10.2011.

### 4.2 Priprava merske opreme

Štirje enaki sprejemniki GNSS z nameščeno enako različico systemske programske opreme, enako nastavljeni in priključeni na isto anteno GNSS so bili hkrati povezani v omrežje GNSS. Sprejemniki so za dostop do proizvodov omrežja uporabljali internetno povezavo (Mobitelov paket Telemetrija z

vklučeno storitvijo DGPS), podatki pa so se prenašali po protokolu NTRIP. V ta namen je bil na vseh sprejemnikih nameščen komunikacijski modul z vgrajenim modemom GSM/GPRS.

Sprejemniki so imeli nastavljen višinski kot za sprejem signalov  $10^\circ$ , kar je s strani proizvajalca privzeta vrednost. Vse kontrole preverjanja kakovosti določitve položaja (filter DOP, največje dopustne vrednosti za oceno natančnosti položaja) so bile izključene. Sprejemniki GNSS so bili nastavljeni tako, da so iz podatkovnega toka RTK sami razbrali tip antene in sprejemnika na referenčni točki.

Sprejemniki so shranjevali podatke LB2 (Leica Binary 2), ki razvijalcem omogočajo popolno rekonstrukcijo celotnega dogajanja na instrumentu, vključno s sledenjem signalov in sprejetimi popravki RTK, iz datoteke pa so bila pridobljena tudi opazovanja RINEX za potrebe naknadne obdelave. Sprejemniki so bili nastavljeni tako, da so takoj po uspešni inicializaciji le-to zavrgli ter začeli novo, neodvisno iskanje neznanega števila celih valov. V ta namen sta bili na pomnilniški kartici instrumentov v imeniku »DBG« nameščeni datoteki »debug.def« in »gps\_desk.def«, ki ju je pripravil proizvajalec merske opreme Leica Geosystems in sta sicer del njihovega razvojnega in testnega okolja. Kot ena od standardnih možnosti sprejemnikov je bilo uporabljeno samodejno shranjevanje točk z intervalom 1 s. Ta način je omogočal ponavljajoče in samodejno izvajanje postopka inicializacije skupaj s samodejnim shranjevanjem izmerjenih vrednosti z najmanjšim posredovanjem operaterja ter s tem pridobitev velikega števila neodvisnih meritev, ki so služile za nadaljnje analize.

### 4.3 Izbira testov

V prvem testu so bili na točkah Šentjakob, Šentvid in Brdo preizkušeni proizvodi RTK omrežja SIGNAL:

- najbližja referenčna postaja, samo GPS (na točkah Šentjakob in Šentvid: Ljubljana, na točki Brdo: Slovenj Gradec),
- najbližja referenčna postaja, GPS in GLONASS (na točkah Šentjakob in Šentvid: Ljubljana, na točki Brdo: Slovenj Gradec),
- mrežni proizvod VRS,
- mrežni proizvod MAC.

Namen testa je bil primerjava vpliva oddaljenosti od najbližje referenčne postaje na kakovost določitve položaja pri referenciranju z najbližje referenčne postaje, ugotavljanje potencialnih prednosti uporabe sistema GLONASS pri navezavi na najbližjo referenčno postajo ter primerjava z mrežnimi proizvodi VRS in MAC.

V drugem testu so bili na točkah Šentjakob, Šentvid in Brdo preizkušeni mrežni proizvodi RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja GNSS Spider:

- mrežni proizvod VRS omrežja SIGNAL,
- mrežni proizvod MAC omrežja SIGNAL,
- mrežni proizvod V-RS<sup>11</sup> omrežja GNSS Spider,
- mrežni proizvod MAX<sup>12</sup> omrežja GNSS Spider.

---

<sup>11</sup> V-RS oziroma Virtual RS je en od proizvodov RTK programske opreme Leica GNSS Spider. Po načinu predstavitve popravkov RTK sledi proizvodu VRS, tako da premični sprejemnik prejema interpolirane popravke glede na njegov približen položaj, bazni vektor pa se nanaša na navidezno točko v bližini sprejemnika. VRS<sup>TM</sup> je blagovna znamka podjetja Trimble Navigation Ltd in pomeni Virtual Reference Station<sup>TM</sup>.

V tem testu so se ugotovljale razlike v zmogljivostih mrežnih algoritmov dveh vodilnih proizvajalcev programske opreme za upravljanje z omrežji GNSS. V omrežju SIGNAL je bila uporabljena programska oprema Trimble VRS<sup>3</sup>Net različice 1.2, v lastnem omrežju pa je bila uporabljena programska oprema Leica GNSS Spider različice 4.1.0.3784. V obeh primerih sta bila uporabljena proizvoda navidezne referenčne postaje in proizvod po konceptu Master-Auxiliary.

Na točki Brdo je bil opravljen še tretji test, primerjava produktov RTK iz lastnega omrežja GNSS Spider:

- mrežni proizvod samodejne izbire najbližje referenčne postaje Nearest,
- mrežni proizvod i-MAX<sup>13</sup>,
- mrežni proizvod MAX,
- mrežni proizvod V-RS.

Ker so bili v testu uporabljeni samo proizvodi lastnega omrežja GNSS, je dejstvo, da mrežna analiza poteka po istem postopku, prav tako interpolacija vplivov za položaj premičnega sprejemnika (v programski opremi GNSS Spider in strojni programski opremi sprejemnikov Leica Viva so vgrajeni enaki algoritmi za interpolacijo vplivov na opazovanja), različna je samo predstavitev mrežnih popravkov, ki sledi ideji posameznih mrežnih konceptov. V testu so se ugotovljale zmogljivosti posameznih predstavitev mrežnih popravkov, s poudarkom na razpoložljivosti (število uspešnih inicializacij, povprečen čas za inicializacijo), kakovosti pridobljenih koordinat in številu grobo pogrešenih meritev.

Preizkus proizvodov RTK lastnega omrežja je bil zaradi pomanjkanja virov omejen samo na točko Brdo, hkrati pa so bile pri največji oddaljenosti od najbližje referenčne postaje pričakovane največje razlike v rezultatih meritev RTK. Vsi proizvodi RTK so bili zaradi večje primerljivosti nastavljeni na uporabo samo opazovanj GPS.

Ker v primeru mrežnega proizvoda MAC/MAX interpolacijo vplivov na opazovanja opravi premični sprejemnik, je bil pričakovan daljši čas za inicializacijo in s tem posledično manjše število inicializacij. Ker pa premični sprejemnik v tem primeru lahko upošteva tudi dejanske razmere na svojem položaju (razpolaga z opazovanji okoliških postaj in lastnimi opazovanji GNSS), lahko prilagodi strategijo in način obravnave opazovanj dejanskim razmeram, je bila pričakovana višja kakovost in zanesljivost (manj grobih pogreškov) določitve položaja. V vseh ostalih primerih se interpolacija opravi v centru omrežja GNSS, zato je bil pričakovan krajši čas za inicializacijo, vendar pa tudi manjša razpoložljivost in nižja kakovost pridobljenih položajev.

Pri testu vpliva dolžine trajanja meritve na natančnost določitve položaja so vsi štirje sprejemniki uporabljali mrežni proizvod MAX lastnega omrežja GNSS Spider.

---

<sup>12</sup> MAX je Leicina oznaka za mrežne popravke RTK na osnovi koncepta Master-Auxiliary (MAC).

<sup>13</sup> i-MAX je Leicina oznaka za individualizirane mrežne popravke RTK na osnovi koncepta Master-Auxiliary (MAC). Gre za alternativo konceptu navideznih postaj, saj se interpolacija vplivov opravi v centru omrežja GNSS, vendar pa se popravki nanašajo na fizično referenčno postajo.

#### 4.4 Merila za ocenjevanje kakovosti meritev

Kot merila za ocenjevanje kakovosti meritev so bili izbrani naslednji kriteriji:

- natančnost določitve položaja

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

- točnost določitve položaja

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_0 - x_i)^2}{n}},$$

pri čemer so bile za pravo vrednost  $x_0$  privzete vrednosti koordinat, določene s statično izmero,  $n$  pa je število vseh fazno določenih meritev,

- število fazno določenih meritev, ki jih je sprejemnik določil v času trajanja posameznega testa,
- število in delež grobo pogrešenih meritev glede na število vseh fazno določenih meritev; pri tem je meritev označena kot grobo pogrešena, če odstopanje položaja presega 0.1 m, odstopanje višine pa presega 0.15 m od prave vrednosti ter hkrati, če odstopanje presega trikratnik standardne deviacije položaja oziroma višine<sup>14</sup>

$$dPos > 3\sigma_{Pos},$$

$$dh > 3\sigma_h,$$

- povprečno število satelitov, vključenih v določitev položaja ter
- povprečna vrednost DOP.

Za vsak proizvod RTK je bila ocenjena tudi potrebna pasovna širina za prenos podatkov iz omrežja GNSS. Ta podatek neposredno vpliva na strošek komunikacije pri uporabi posamezne storitve RTK<sup>15</sup>.

#### 4.5 Vzpostavitev lastnega omrežja referenčnih postaj GNSS

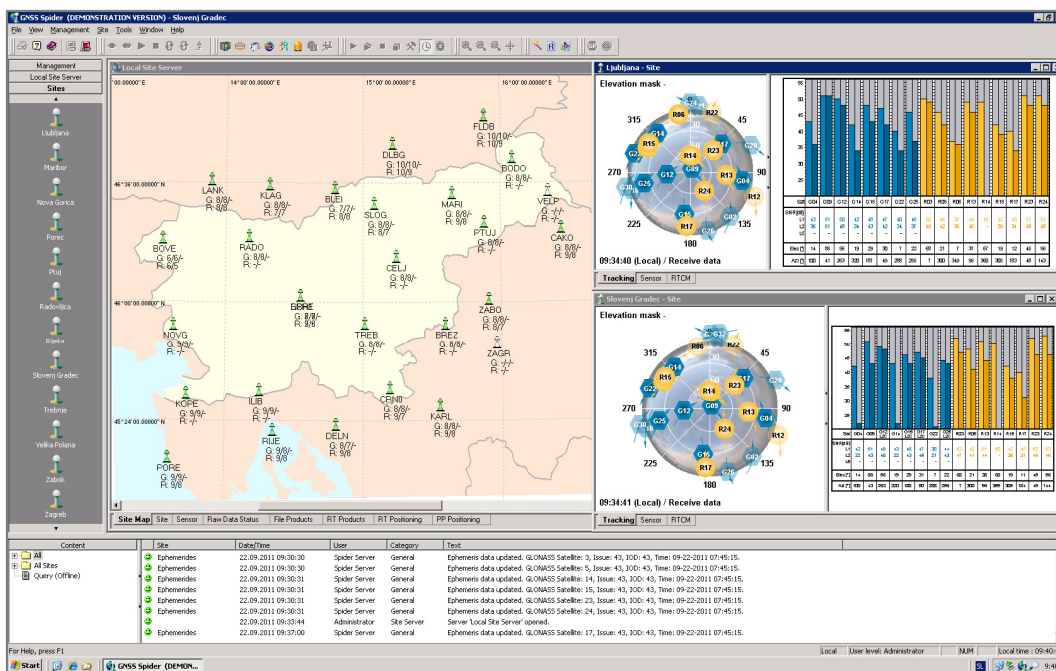
Podatkovni center lastnega omrežja je bil vzpostavljen v prostorih podjetja Geoservis. Strežnik Lenovo ThinkStation z nameščenim operacijskim sistemom Windows 2003 Server je bil postavljen v območju DMZ lokalnega omrežja podjetja. Za dostop do interneta je bila uporabljena obstoječa 20 Mb/20 Mb optična povezava. Dostop do podatkov referenčnih postaj omrežij SIGNAL, APOS in CROPOS je bil urejen preko NTRIP Casterja Geodetskega inštituta Slovenije, dostop do podatkov referenčne postaje ZALA pa preko NTRIP Casterja Observatorija za satelitsko geodezijo FÖMI, ki upravlja z madžarskim omrežjem GNSSNet.hu. Na Geodetskem inštitutu so bile pridobljene dodatnečasne licence »Single Station« za programsko opremo Trimble VRS<sup>3</sup>Net, ki so omogočale dostop do storitev posameznih referenčnih postaj, torej tudi do surovih podatkov, s čimer so bili zagotovljeni neprestani hkratni dostopi NTRIP do surovih opazovanj vseh domačih in tujih referenčnih postaj omrežja SIGNAL.

Referenčna postaja GNSS Geoservis, ki je služila samo za pridobitev točnega časa in efemerid, v mrežno obdelavo pa ni bila vključena, je bila povezana neposredno preko TCP/IP.

---

<sup>14</sup> Če ocena natančnosti nakazuje potencialno grobo pogrešeno meritev, taka meritev ni bila upoštevana kot grobo pogrešena. Če je na primer ocena natančnosti določitve položaja  $2DCQ = 0.041 m$ , odstopanje izmerjenega položaja od prave vrednosti pa je  $0.116 m (> 0.010 m)$ , se to ni upoštevalo kot grobi pogrešek, saj  $3 \times 2DCQ > dPos$ .

<sup>15</sup> V običajnih razmerah je strošek komunikacije odvisen od količine prenesenih podatkov. Različni mobilni operaterji imajo glede na izbrani paket v ceno že lahko vključeno določeno količino podatkov. V primeru slovenskega omrežja SIGNAL pa pavšalna mesečna naročnina na storitev DGPS, ki jo trži mobilni operater Mobitel, vključuje vse prenose podatkov brez omejitev.



Slika 65: Lastno omrežje GNSS realizirano s programom Leica GNSS Spider.

Figure 65: Authors own GNSS network established using Leica GNSS Spider software.

#### 4.5.1 Podatki o referenčnih postajah GNSS

Za vse referenčne postaje so bile na spletni strani omrežja SIGNAL zbrane datoteke LOG, iz katerih so bili pridobljeni podatki o uporabljenih tipih in višinah anten ter tipih sprejemnikov GNSS. Koordinate vseh vključenih referenčnih postaj so bile pridobljene iz dokumentov *Izračun koordinat stalnih postaj* (Omrežje SIGNAL, Služba za GPS, 2007) in (Omrežje SIGNAL, Služba za GPS, 2011). Koordinate v sestavu ITRF05 za referenčne postaje omrežja CROPOS in GNSSNet.hu so bile pridobljene z zasebno korespondenco avtorja z upravljavci omenjenih omrežij.

Pri vzpostavljanju lastnega omrežja GNSS je bila nastavitvam tipov anten in sprejemnikov, višin anten ter koordinat posvečena največja možna pozornost, saj so to ključni podatki vsake referenčne postaje in vsakega omrežja, ki bistveno vplivajo na kakovost delovanja omrežja, vse napake pa se neposredno prenašajo k uporabniku, kjer se lahko izkazujejo kot težave pri inicializaciji (na primer počasna inicializacija) ali pogreški pri določitvi položaja, še posebej pri višini, na katero odločilno vplivajo podatki o uporabljenih antenah, pripadajočih odmikih faznih centrov in variacijah faznih centrov.

Ker omrežje SIGNAL sestavljajo različni sprejemniki GNSS, v centru Službe za GPS in v lastnem omrežju pa sta bila tudi uporabljena dva različna programska paketa za upravljanje omrežij, je bila prva naloga določiti ustrezne zapise za tokove surovih podatkov z referenčnih postaj. Leica GNSS Spider omogoča pasivni dostop do sprejemnikov GNSS, kar pomeni, da teh sprejemnikov ne more nastavljanje, sprejema pa celotne vsebine njihovih podatkov. Za dostop do podatkovnih tokov sprejemnikov Leica GRX1200 je bil uporabljen zapis Passive LB2, za dostop do tokov sprejemnikov Leica GRX1200GG pa RTCM 3, saj programska oprema Trimble VRS<sup>3</sup>Net ne podpira razširjenega protokola LB2 (GPS+GLONASS), ki je lasten proizvajalcu Leica. Za dostop do podatkovnih tokov sprejemnikov Trimble NET RS (GPS) je bil uporabljen zapis Passive Trimble, saj je v programski opremi Leica GNSS Spider vgrajena podpora protokolu Trimble RT17. Ker razširjeni protokol Trimble RT27 (GPS+GLONASS) ni vgrajen v GNSS Spider, pa je bil za dostop do podatkovnih tokov



sprejemnikov Trimble Net R5 uporabljen zapis RTCM 3. Za dostop do sprejemnikov Javad je bil prav tako uporabljen pasivni dostop v zapisu RTCM 3<sup>16</sup>. Parametri za dostop do podatkov referenčnih postaj so povzeti v preglednici 20.

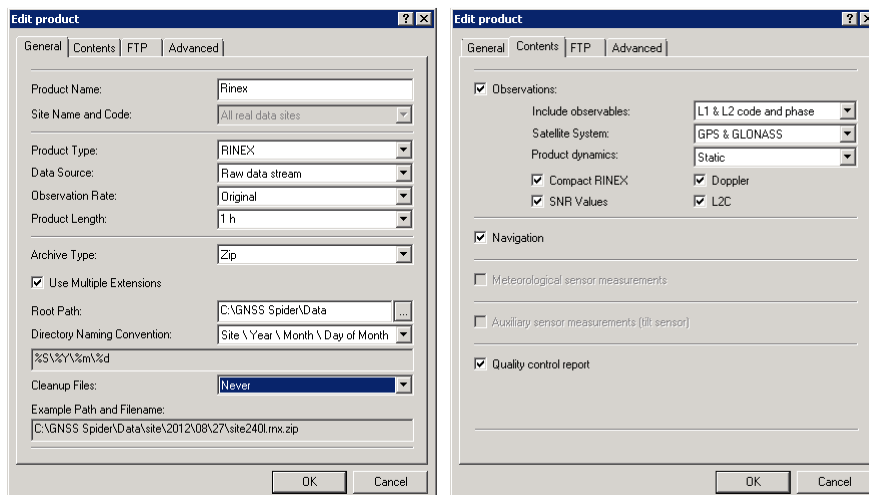
Preglednica 20: Parametri za dostop do tokov podatkov referenčnih postaj.

Table 20: Connection parameters, data stream and protocol for raw data access.

Ime	Koda	Tip sprejemnika	Podatkovni tok	Povezava	IP:vrata/Priključna točka
Bleiburg	BLEI	JPS LEGACY	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawBLEI
Bodonci	BODO	TRIMBLE NETRS	Passive Trimble	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawBODO_RT17
Bovec	BOVE	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawBOVE_RTCM3
Brezice	BREZ	TRIMBLE NETRS	Passive Trimble	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawBREZ_RT17
Cakovec	CAKO	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawCAKO
Celje	CELJ	LEICA GRX1200PRO	Passive LB2	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawCELJ
Crnometlj	CRNO	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawCRNO_RTCM3
Delnice	DELN	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawDELN
Deutschlandsberg	DLBG	LEICA GRX1200+GNSS	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawDLBG
Ephemerides	EPHE	LEICA GRX1200GGPRO	Passive LB2	TCP/IP	192.168.200.2:10002
Feldbach	FLDB	LEICA GRX1200+GNSS	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawFLDB
Ljubljana	GSR1	LEICA GRX1200GGPRO	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawGSR1
Ilirska Bistrica	ILIB	TRIMBLE NETRS	Passive Trimble	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawILIB_RT17
Karlovac	KARL	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawKARL
Klagenfurt	KLAG	JPS E_GGD	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawKLAG
Koper	KOPE	LEICA GRX1200PRO	Passive LB2	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawKOPE
Landskron	LANK	JPS LEGACY	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawLANK
Maribor	MARI	LEICA GRX1200GGPRO	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawMARI
Nova Gorica	NOVG	LEICA GRX1200PRO	Passive LB2	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawNOVG
Porec	PORE	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawPORE
Ptuj	PTUJ	LEICA GRX1200PRO	Passive LB2	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawPTUJ
Radovljica	RADO	TRIMBLE NETRS	Passive Trimble	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawRADO_RT17
Rijeka	RIJE	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawRIJE
Slovenj Gradec	SLOG	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawSLOG_RTCM3
Trebnje	TREB	TRIMBLE NETRS	Passive Trimble	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawTREB_RT17
Zabok	ZABO	TRIMBLE NETR5	Passive RTCM3.x	NTRIP	193.2.110.246:8080/rawZABO
Zalaegerszeg	ZALA	LEICA GRX1200GGPRO	Passive RTCM3.x	NTRIP	84.206.45.44:2101/ZALA_RAW-RTCM3.0

Za vse referenčne postaje (razen za postajo GNSS Geoservis, EPHE) so bile uporabljene tako koordinate v končnem, uporabniškem datumu ETRS89 (D96) kot tudi fizične koordinate v ITRF05 (različnih epoh), shranjevala so se surova opazovanja v zapisu RINEX z intervalom shranjevanja 5 s (slika 66).

<sup>16</sup> Iz avtorjeve ustne korespondence z razvijalci programske opreme za upravljanje GNSS omrežij izhaja, da je v preteklosti obstajala neformalna praksa izmenjave protokolov za upravljanje s sprejemniki po sistemu »daj-dam«, tako da sta lahko oba v svojo programsko opremo vgradila neposredno podporo za konkurenčne sprejemnike. Od uvedbe standarda RTCM 3 pa ta problem ni več zelo očiten, saj zapis omogoča prenos vseh relevantnih podatkov o opazovanjih, pošiljanje v tem zapisu pa je vgrajeno v vse sodobne (referenčne) sprejemnike GNSS in programsko opremo za upravljanje s postajami in omrežji GNSS.



Slika 66: Nastavitev parametrov za shranjevanje datotečnih proizvodov Rinex v programu GNSS Spider.  
Figure 66: Rinex file product settings in GNSS Spider software.

Tako vzpostavljeno lastno omrežje je topološko enako državnemu omrežju SIGNAL, kar je osnova za korektno primerjavo proizvodov obeh omrežij.

#### 4.5.2 Upravljanje z antenami GNSS

Leica GNSS Spider različice 2.2 in novejšje uporablja izključno podatke o absolutnih antenskih kalibracijah. Privzeti podatki o absolutnih kalibracijah anten Leica, ki so prednastavljene v programu, so tako imenovane »Type-Mean« kalibracije, ki temeljijo na povprečju najmanj petih kalibracij različnih anten istega tipa, ki jih za Leico Geosystems izvaja nemško podjetje Geo++.

Razlog za uporabo absolutnih antenskih kalibracij pred relativnimi so predvsem:

- terenski postopki za določitev relativnih kalibracij niso tako natančni kot postopki za določitev absolutnih kalibracij (predvsem za določitev odvisnosti variacij faznega centra od smernega kota vpada signala),
- v primeru velikih omrežij GNSS, kjer površine elipsoida ni mogoče reducirati na ravnino, se skupna referenčna antena, ki je bila uporabljena v relativnih kalibracijah ne izniči,
- v primeru absolutnih antenskih kalibracij se popravki RTK lahko reducirajo na navidezno, idealno točko, ničelno anteno (ang. Null-Antenna)<sup>17</sup>, kar pomeni, da premični sprejemnik ne potrebuje podatkov o dejansko uporabljeni anteni na referenčni postaji GNSS, saj vedno sprejema enake referenčne podatke, ne glede na dejansko uporabljen tip antene na referenčni postaji; to poenostavi delo tako upravljavcem omrežja kot uporabnikom storitev RTK, saj tudi slednjim ni več treba skrbeti za nameščanje, pravilno izbiro in pravilno uporabo podatkov o uporabljenih referenčnih antenah (Leica Geosystems, 2010).

<sup>17</sup> Ničelna antena ima po definiciji absolutne in izotropne karakteristike, kar pomeni, da je njen sevalni diagram kroglja, nima variacij faznih centrov (PCV), odmiki faznih centrov (PCO) pa so reducirani na fizično referenčno točko antene (ARP). Absolutno kalibracijo ničelne antene zato sestavljajo same vrednosti 0.0 tako za odmike kot za variacije faznih centrov. Relativna kalibracija ničelne antene pa je potrebna zaradi združljivosti z drugimi relativnimi antenskimi kalibracijami, in sicer tako, da so odmiki faznih centrov 0.0, variacije faznih centrov pa so nasprotno-predznačene vrednosti variacij faznih centrov absolutne kalibracije referenčne antene, ki se uporablja za določitev relativnih kalibracij.

Ker so v omrežju uporabljene antene različnih proizvajalcev, so za pridobitev absolutnih antenskih kalibracij na voljo naslednje možnosti:

- pridobitev individualnih absolutnih kalibracij za vse antene v omrežju pri podjetju, ki nudi storitve individualnih kalibracij, na primer Geo++,
- pridobitev »Type-Mean« absolutnih kalibracij za vsak tip ne-Leicinih anten v omrežju pri podjetju Geo++,
- uporaba javno dostopnih absolutnih antenskih kalibracij služb, kot sta na primer IGS ali NGS.

Najboljša, najdražja in tudi logistično najbolj zahtevna možnost je pridobitev individualnih absolutnih kalibracij za vsako anteno v omrežju. Pri tem je treba vsako anteno poslati na kalibracijo v ustrezen laboratorij. Najbolj enostavna možnost pa je uporaba javno dostopne baze podatkov o antenskih kalibracijah. Če za relativne kalibracije velja, da je treba vedno uporabiti podatke za vse antene iz istega vira (da se zagotovi, da je uporabljena ista referenčna antena), pa to za absolutne kalibracije ne velja popolnoma. Pri absolutni kalibraciji se namreč vsi odmiki in variacije faznih centrov nanašajo na fizično izhodiščno točko na anteni. Tako se lahko uporabljajo absolutne kalibracije nekaterih anten v omrežju iz vira »A« in druge absolutne kalibracije iz vira »B«. Kljub temu pa je priporočljivo uporabljati vse antenske kalibracije iz enega vira. Tako se zagotovi, da so uporabljene iste metode (preizkus z obračanjem antene z robotom ali uporaba umetnih signalov v »gluhi« sobi ...), načini obdelave in povprečenja rezultatov kalibracij za vse uporabljene antene v omrežju (Leica Geosystems, 2010). V nalogi so bile uporabljene absolutne antenske kalibracije službe NGS<sup>18</sup>.



Slika 67: Antena Leica AR25 Rev.4 z antenskim elementom Dorne-Margolin in 3D dušilnimi obroči.  
*Figure 67: Leica AR25 Rev.4 reference antenna incorporates Dorne-Margolin element and 3D choke-rings.*

Različne možnosti antenskih kalibracij so prikazane na primeru antene Leica AR25 Rev.4, ki je namenjena namestitvi na referenčnih postajah nacionalnih in globalnih omrežij ter za različne znanstvene aplikacije, kjer se zahteva sledenje nizkih satelitov (slika 67):

- privzeta relativna antenska kalibracija iz paketa Leica Geo Office<sup>19</sup>
- ```
LEIAR25.R4      NONE Dorne Margolin with 3D choke ring (Revis LEI
0.9            0.9      159.4
```

<sup>18</sup> Podatki o absolutnih antenskih kalibracijah so bili za potrebe naloge prevzeti iz spletne strani službe NGS ameriške Zvezne uprave za oceane in ozračje, NOAA na naslovu <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs08.atx> v standardnem zapisu ANTEX.

<sup>19</sup> Podatki o relativnih antenskih kalibracijah so prikazani v zapisu ANTINFO, Antenna Information Format, Version 003, ki je definiran:

| ANTENNA ID                                        | DESCRIPTION | DATA SOURCE | (# OF TESTS) | YR/MO/DY           |
|---------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------------|
| [north] [ east] [ up ]                            |             |             |              | AVE = # in average |
| [90] [85] [80] [75] [70] [65] [60] [55] [50] [45] |             |             |              | L1 Offset (mm)     |
| [40] [35] [30] [25] [20] [15] [10] [ 5] [ 0]      |             |             |              | L1 Phase at        |
|                                                   |             |             |              | Elevation (mm)     |
| [north] [ east] [ up ]                            |             |             |              | L2 Offset (mm)     |
| [90] [85] [80] [75] [70] [65] [60] [55] [50] [45] |             |             |              | L2 Phase at        |
| [40] [35] [30] [25] [20] [15] [10] [ 5] [ 0]      |             |             |              | Elevation (mm)     |

|      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 8.2  | 9.2  | 10.6 | 12.0 | 13.2  | 14.2 | 15.0 | 15.6 | 15.8 | 15.7 |
| 14.9 | 13.6 | 11.6 | 9.2  | 6.6   | 4.0  | 1.9  | 0.5  | 0.0  |      |
|      | 0.1  | 0.0  |      | 153.6 |      |      |      |      |      |
| 7.3  | 6.6  | 6.2  | 5.6  | 5.0   | 4.2  | 3.5  | 2.9  | 2.6  | 2.4  |
| 2.1  | 1.8  | 1.4  | 1.0  | 0.6   | 0.3  | 0.1  | 0.0  | 0.0  |      |

- relativna antenska kalibracija službe NGS

```
LEIAR25.R4      NONE Dorne Margolin with 3D choke ring (Revis NGS ( 3) 10/11/16
0.6            -1.0      175.2
0.0  1.5      3.6  5.9  8.2  10.2  11.9  13.0  13.5  13.4
12.6  11.3    9.5  7.3  5.0  2.7  0.8  0.0  0.0
-0.6      -0.3      163.9
0.0  -0.4  -0.5  -0.4  -0.2  0.0  0.2  0.4  0.4  0.4
0.3  0.2  0.0  -0.3  -0.5  -0.6  -0.6  0.0  0.0
```

- privzeta absolutna antenska kalibracija iz paketa Leica GNSS Spider<sup>20</sup>

```
LEIAR25.R4      NONE                               TYPE / SERIAL NO
ROBOT          Geo++ GmbH                         5  2010-05-17METH / BY / # / DATE
5.0            DAZI
0.0  90.0    5.0  ZEN1 / ZEN2 / DZEN
4              # OF FREQUENCIES
#              COMMENT
# (C) Geo++ GmbH COMMENT
# www.geopp.de  COMMENT
#              COMMENT
# Antenna Phase Center Variations COMMENT
#              COMMENT
# Antenna Type Correction COMMENT
# computed by Geo++ COMMENT
# Antenna Type: LEIAR25.R4      NONE COMMENT
# Antenna Setup ID: 0 COMMENT
# Antenna Type Correction Date: 2010-05-11 COMMENT
# Number of Calibrated Antennas: 5 COMMENT
# Number of Individual GPS-Calibrations: 10 COMMENT
# Number of Individual GLO-Calibrations: 12 COMMENT
# GNSS: GPS/GLONASS COMMENT
#              COMMENT
# Type Mean generated for: COMMENT
#              COMMENT
#              Geo++ GmbH COMMENT
#              Steinriede 8 COMMENT
#              D-30827 Garbsen COMMENT
#              Germany COMMENT
#              www.geopp.de COMMENT
#              COMMENT
G input file: leiar25.r4_____none.ant COMMENT
G input file: leiar25.r4_____none.ane COMMENT
#              COMMENT
# (c) Geo++ GmbH COMMENT
# www.geopp.de COMMENT
#              COMMENT
# Antenna Phase Center Variations COMMENT
#              COMMENT
#              COMMENT
# GLONASS PCV COMMENT
# derived from Delta PCV per 25.0 MHz COMMENT
# for frequency channel number k=0 COMMENT
#              COMMENT
# created by ant2ant 17-MAY-10 13:33:29 COMMENT
#              COMMENT
R input file: leiar25.r4_____none_k0.ant COMMENT
R input file: leiar25.r4_____none_k0.ane COMMENT
created by ant2atx 17-MAY-10 13:33:29 COMMENT
G01          START OF FREQUENCY
0.88         0.87  159.36 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00  0.16  0.62  1.27  1.96  2.51  2.78  2.68  2.20  1.43  0.52  -0.40  -1.18  -1.72  -1.93  -1.66  -0.73  1.05  3.69
0.0  0.00  0.19  0.69  1.39  2.11  2.66  2.90  2.74  2.21  1.43  0.54  -0.31  -1.01  -1.51  -1.73  -1.54  -0.73  0.90  3.43
5.0  0.00  0.19  0.69  1.38  2.10  2.65  2.88  2.71  2.16  1.36  0.46  -0.40  -1.11  -1.62  -1.85  -1.68  -0.91  0.69  3.22
10.0 0.00  0.19  0.68  1.38  2.09  2.63  2.86  2.67  2.12  1.31  0.39  -0.47  -1.20  -1.72  -1.96  -1.81  -1.06  0.52  3.05
15.0 0.00  0.18  0.68  1.37  2.08  2.62  2.83  2.65  2.08  1.26  0.34  -0.54  -1.28  -1.81  -2.06  -1.91  -1.16  0.42  2.95
20.0 0.00  0.18  0.67  1.35  2.06  2.60  2.81  2.62  2.06  1.23  0.30  -0.60  -1.35  -1.89  -2.14  -1.97  -1.20  0.39  2.91
...
R02          END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA
```

- absolutna antenska kalibracija službe NGS

```
LEIAR25.R4      NONE                               TYPE / SERIAL NO
ROBOT          Geo++ GmbH                         5  25-MAR-11METH / BY / # / DATE
5.0            DAZI
0.0  90.0    5.0  ZEN1 / ZEN2 / DZEN
4              # OF FREQUENCIES
IGS08_1700     SINEX CODE
# Number of Calibrated Antennas: 5 COMMENT
# Number of Individual GPS-Calibrations: 10 COMMENT
# Number of Individual GLO-Calibrations: 12 COMMENT
# GLONASS PCV COMMENT
# derived from Delta PCV per 25.0 MHz COMMENT
# for frequency channel number k=0 COMMENT
G01          START OF FREQUENCY
0.88         0.87  159.36 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00  0.16  0.62  1.27  1.96  2.51  2.78  2.68  2.20  1.43  0.52  -0.40  -1.18  -1.72  -1.93  -1.66  -0.73  1.05  3.69
0.0  0.00  0.19  0.69  1.39  2.11  2.66  2.90  2.74  2.21  1.43  0.54  -0.31  -1.01  -1.51  -1.73  -1.54  -0.73  0.90  3.43
5.0  0.00  0.19  0.69  1.38  2.10  2.65  2.88  2.71  2.16  1.36  0.46  -0.40  -1.11  -1.62  -1.85  -1.68  -0.91  0.69  3.22
10.0 0.00  0.19  0.68  1.38  2.09  2.63  2.86  2.67  2.12  1.31  0.39  -0.47  -1.20  -1.72  -1.96  -1.81  -1.06  0.52  3.05
15.0 0.00  0.18  0.68  1.37  2.08  2.62  2.83  2.65  2.08  1.26  0.34  -0.54  -1.28  -1.81  -2.06  -1.91  -1.16  0.42  2.95
20.0 0.00  0.18  0.67  1.35  2.06  2.60  2.81  2.62  2.06  1.23  0.30  -0.60  -1.35  -1.89  -2.14  -1.97  -1.20  0.39  2.91
25.0 0.00  0.18  0.66  1.34  2.04  2.58  2.79  2.61  2.05  1.22  0.28  -0.63  -1.41  -1.95  -2.20  -2.00  -1.19  0.43  2.94
30.0 0.00  0.17  0.65  1.32  2.02  2.56  2.77  2.60  2.05  1.22  0.27  -0.66  -1.45  -2.00  -2.23  -1.99  -1.13  0.53  3.04
...
R02          END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA
```

<sup>20</sup> Podatki o absolutnih antenskih kalibracijah so prikazani v zapisu ANTEX, Antenna Exchange Format, Version 1.4.

### Primer antenskih kalibracij za ničelno anteno ADVNULLANTENNA<sup>21</sup>

- privzeta relativna antenska kalibracija iz paketa Leica Geo Office

| GPPNULLANTENNA |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | 0.0  |      | 0.0  |      | 0.0  |      |      |      |      |      |
|                | 3.9  | 7.6  | 10.7 | 13.0 | 14.6 | 15.4 | 15.6 | 15.5 | 14.8 | 13.8 |
|                | 12.4 | 10.6 | 8.6  | 6.4  | 4.4  | 2.6  | 1.2  | 0.3  | 0.0  |      |
|                |      | 0.0  |      | 0.0  |      | 0.0  |      |      |      |      |
|                | -1.7 | 1.4  | 3.7  | 5.3  | 6.4  | 7.3  | 7.9  | 8.2  | 8.1  | 7.6  |
|                | 6.7  | 5.6  | 4.5  | 3.4  | 2.3  | 1.4  | 0.6  | 0.2  | 0.0  |      |

- privzeta absolutna antenska kalibracija iz paketa Leica GNSS Spider

| GPPNULLANTENNA |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 0.0 |     | 0.0 |     | 0.0 |     |     |     |     |     |
|                | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|                | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |     |
|                |     | 0.0 |     | 0.0 |     | 0.0 |     |     |     |     |
|                | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|                | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |     |

### 4.5.3 Upravljanje z antenami GNSS na premičnem sprejemniku

Večina komercialnih programskih paketov za naknadno obdelavo opazovanj GNSS in večina premičnih sprejemnikov GNSS zaradi združljivosti uporablja relativne antenske kalibracije. Kadar premični sprejemnik GNSS sprejema referenčne podatke, ki so reducirani na ničelno anteno (tip antene GPPNULLANTENNA) sta na voljo dve možnosti:

- Če je na premičnem sprejemniku na voljo absolutna antenska kalibracija za uporabljeno premično anteno GNSS, potem se referenčnih podatkov ne popravlja, opazovanja premičnega sprejemnika pa se reducirajo z absolutno antensko kalibracijo uporabljene antene. Za referenčno anteno je treba nastaviti uporabniško anteno, ki ima vse odmike in variacije faznih centrov 0.0.
- Če je na premičnem sprejemniku na voljo samo relativna kalibracija za uporabljeno premično anteno GNSS, potem se opazovanja premičnega sprejemnika reducirajo za vrednosti relativnih odklikov in variacij faznih centrov. Dodatno mora sprejemnik tudi referenčne podatke reducirati za relativno kalibracijo ničelne antene. Za referenčno anteno je treba nastaviti tip antene ADVNULLANTENNA. Ker so na sprejemnikih posameznih proizvajalcev običajno že nameščene relativne kalibracije za vse tipe proizvajalčevih anten in tudi za pripadajočo ničelno anteno, je to za uporabnika najbolj enostavna možnost, ki zagotavlja najmanj napak. Relativni kalibracijski podatki ničelne antene se določijo iz absolutnih kalibracijskih podatkov referenčne antene, uporabljene pri relativni kalibraciji.

Če pa omrežje GNSS ne popravi referenčnih podatkov za absolutne kalibracije (tip antene v sprejetih podatkih RTK je dejansko uporabljena antena na referenčni postaji), mora premični sprejemnik opazovanja referenčne postaje reducirati za absolutno kalibracijo referenčne antene, lastna opazovanja pa reducirati za absolutno kalibracijo svoje uporabljene antene. V tem primeru morajo biti na premičnem sprejemniku nameščene absolutne kalibracije za uporabljeno premično anteno in vse referenčne antene v omrežju GNSS (Leica Geosystems, 2006). Vse tri možnosti povzema preglednica 21, priporočena možnost pa je označena z zeleno.

---

<sup>21</sup> Oznaka IGS za ničelno anteno ADVNULLANTENNA je GPPNULLANTENNA.

Preglednica 21: Potrebne nastavitve anten na premičnem sprejemniku GNSS glede na nastavitve upravljanja z antenami v osrednji programski opremi za upravljanje z omrežjem.

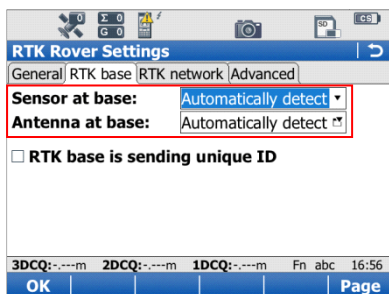
Table 21: Proper handling of reference and rover antennas on the Leica Viva GNSS rover with respect to Null antenna settings in the network.

| Nastavitev na Leica GNSS Spider:<br>redukcija na ničelno anteno |    | Nastavitev na premičnem sprejemniku Leica Viva:<br>uporabljeni tipi antenskih kalibracij |                       |
|-----------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Da                                                              | Ne | Referenčna antena                                                                        | Premična antena       |
| ✓                                                               |    | Absolutna kalibracija <sup>*1</sup>                                                      | Absolutna kalibracija |
| ✓                                                               |    | Relativna kalibracija <sup>*2</sup>                                                      | Relativna kalibracija |
|                                                                 | ✓  | Absolutna kalibracija <sup>*3</sup>                                                      | Absolutna kalibracija |

\*1 Potrebna je ročna nastavitve antene, za katero so absolutne vrednosti odmkov in variacij faznih centrov 0.0.

\*2 Potrebna je nastavitve relativne kalibracije ničelne antene. Ker je na vseh sprejemnikih GNSS Leica že prednastavljena privzeta relativna kalibracija ničelne antene, ki ustreza vsem privzetim proizvajalčevim antenam GNSS, sprejemnik pa v primeru sprejema referenčnih podatkov v zapisih Leica, Leica 4G ali RTCM 3.x, tudi sam razbere tip referenčne antene, lahko uporabnik nastavi samodejno izbiranje referenčne antene («Antenna at base: Automatically detect»), kot to prikazuje slika 68.

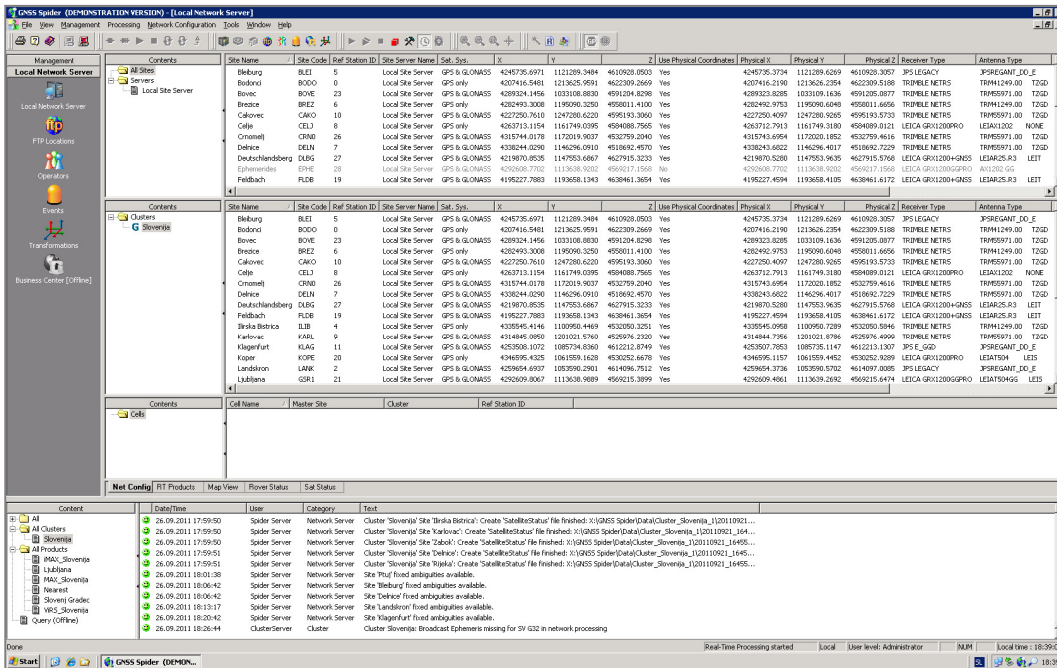
\*3 Na premičnem sprejemniku morajo biti shranjene absolutne kalibracije vseh referenčnih anten v omrežju GNSS. Uporabnik mora poskrbeti, da je v vsakem primeru vedno nastavljen ustrezen tip referenčne antene, kar je še posebej zahtevno v omrežjih z različnimi proizvajalci in tipi anten ter v primeru mrežnih proizvodov RTK, kjer programska oprema v podatkovnem centru sproti izbira najprimernejšo referenčno postajo.



Slika 68: Premični sprejemnik lahko podatke o referenčni anteni in sprejemniku razbere iz sporočil RTK.  
Figure 68: Rover can extract reference station antenna and receiver types directly from RTK messages.

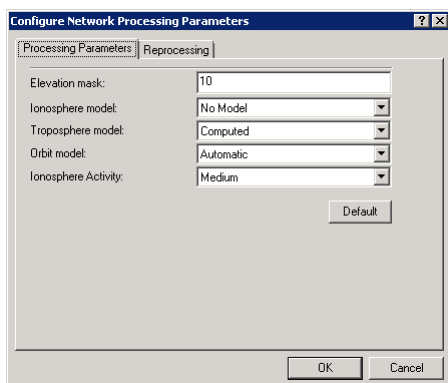
#### 4.5.4 Nastavitev lastnega omrežja GNSS

Ko so bile v modulu Spider Site Server nastavljene referenčne postaje celotnega omrežja ter shranjevanje surovih opazovanj v zapisu Rinex, kar omogoča tudi kasnejšo ponovno obdelavo omrežja (ang. Network Re-processing), je bilo ustrezno nastavljeno tudi omrežje, grozd in proizvodi RTK (ang. RT Products).



Slika 69: Zaradi majhnega števila referenčnih postaj so bile vse postaje omrežja GNSS združene v en grozd.  
Figure 69: All reference stations were assigned to a single cluster due to a small scale GNSS network.

V modulu Spider Network Server so bile najprej prevzete vse referenčne postaje razen postaje EPHE. Ustvarjen je bil grozd »Slovenija« (slika 69). Ker je izmed 15 domačih referenčnih postaj omrežja SIGNAL v času izvajanja terenskih meritev samo 5 postaj omogočalo sprejem signalov GPS in GLONASS, po priporočilih proizvajalca programske opreme GNSS Spider opazovanja GLONASS v mrežno obdelavo in proizvođe RTK niso bila vključena, saj so bazni vektorji med posameznimi postajami GLONASS predolgi, dodatni napor mrežne programske opreme pri določitvi fazne nedoločenosti kombiniranega omrežja z redkimi postajami GLONASS pa bi kvarno vplival na delovanje celotnega omrežja. Tudi po zagotovilih upravljavca omrežja SIGNAL v mrežnih proizvodih tega omrežja naj ne bi bila vključena opazovanja GLONASS, zato se je mrežna analiza izvajala samo z upoštevanjem sistema GPS.



Slika 70: Privzete nastavitve parametrov za obdelavo omrežja GNSS so bile uporabljene tudi v lastnem omrežju.  
Figure 70: For the realization of own GNSS network default processing parameters were used.

Za vse parametre mrežne analize (ang. Network Processing Parameters) so bile uporabljene privzete vrednosti (slika 70):

- Najmanjši višinski kot satelitov:  $10^\circ$

Uporaba nižje vrednosti bi sicer omogočila hitrejšo razpoložljivost mrežnih popravkov za vzhajajoče satelite, vendar pa so signali s satelitov z nizkim višinskim kotom bolj podvrženi vplivom večpotja in nemodeliranim vplivom atmosfere, poleg tega pa je tudi privzeta vrednost višinskega kota na premičnih sprejemnikih nastavljena na  $10^\circ$ , zato je takšna vrednost najboljši kompromis.

- Uporabljen ionosferski model: brez

Uporaba ionosferskega modela predstavlja predhodno redukcijo surovih opazovanj, torej pred postopkom izračuna fazne nedoločenosti. Aktualna različica programske opreme Leica GNSS Spider v času pisanja (4.4.0.5225) ima privzeto nastavljeno samodejno izbiro ionosferskega modela glede na oceno aktivnosti ionosfere ter glede na razpoložljivost podatkov. Najvišji status ima uporaba modelov, ki temeljijo na predvidenih vplivih iz podatkov IONEX in zagotavljajo najbolj točno a-priori oceno stanja ionosfere, saj temeljijo na obdelavi opazovanj globalne mreže referenčnih postaj. Če teh podatkov ni na voljo (GNSS Spider jih samodejno prevzema iz strežnikov FTP organizacij IGS ali CODE), ja uporabljen Klobucharjev model. Parametri, ki jih model potrebuje, so vsebovani v navigacijskih sporočilih vsakega satelita GPS. Ker se s tem modelira le približno 50% vpliva ionosfere, njegova uporaba v času nizke ionosferske aktivnosti ni smiselna. Neuporaba ionosferskega modela ima najnižjo prioriteto. Ta možnost se lahko uporabi v obdobjih nizke aktivnosti ionosfere.

- Uporabljen troposferski model: izračunan

Na voljo so različne možnosti: brez modela, izračunan model, Hopfield, Saastamoinen, Neill in modificiran Hopfield. Izračunan troposferski model upošteva standardno troposfero, preostali vpliv troposfere pa se oceni v sklopu mrežne analize. Uporaba standardnih troposferskih modelov, kakršen je na primer modificiran Hopfieldov, zanemari vse lokalne deviacije troposferskih vplivov. Med posameznimi modeli za satelite z višinskim kotom nad  $5^\circ$  ni velikih razlik (red nekaj milimetrov). Uporaba drugih troposferskih modelov (Neill, Saastamoinen) je primerna v omrežjih z velikimi višinskimi razlikami med referenčnimi postajami. Nastavitev brez modela pa je uporabna v specifičnih znanstvenih aplikacijah, na primer meteorologiji.

- Uporabljen orbitalni model: samodejen

V tem primeru mrežni popravki vsebujejo podatke o oddanih efemeridah, ker te podatke uporablja tudi premični sprejemnik, mrežni algoritem pa za določitev fazne nedoločenosti omrežja uporablja najhitrejšo precizno efemeride (IGU), ki jih program samodejno prevzema iz strežnikov FTP službe IGS ali druge. Če preciznih efemerid ni na voljo, mrežni algoritem uporablja oddane efemeride.

V lastnem omrežju so bili ustvarjeni proizvodi RTK, ki so podani v preglednici 22.

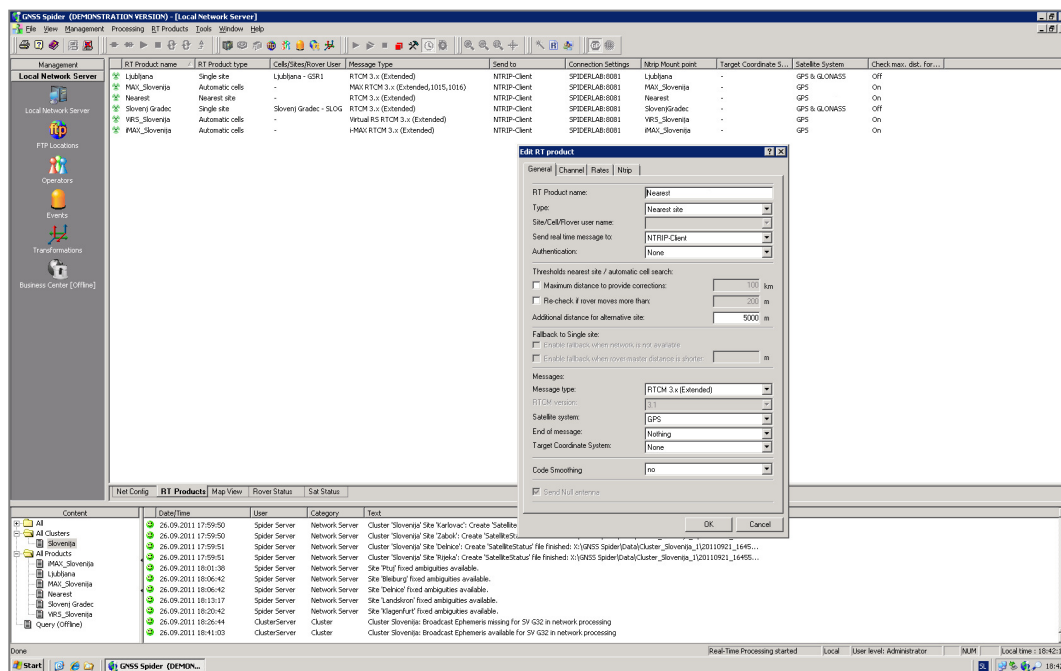


Preglednica 22: Proizvodi RTK lastnega omrežja GNSS.

Table 22: RTK products of own GNSS network.

| Ime proizvoda   | Tip proizvoda                | Zapis podatkov       | Sistem GNSS    |
|-----------------|------------------------------|----------------------|----------------|
| Ljubljana       | Posamezna postaja            | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS in GLONASS |
| Slovenj Gradec  | Posamezna postaja            | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS in GLONASS |
| Nearest         | Najbližja postaja            | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS            |
| MAX_Slovenija   | MAX, Samodejna celica        | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS            |
| i-MAX_Slovenija | i-MAX, Samodejna celica      | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS            |
| ViRS_Slovenija  | Virtual RS, Samodejna celica | RTCM 3.x (Razširjen) | GPS            |

Vsi proizvodi RTK so bili dostopni preko Spider RTK Proxy Serverja na zunanjem IP naslovu podjetja Geoservis, vrata 8081. Način razpošiljanja popravkov RTK je bil izveden tako, kot je običajno v vseh omrežjih GNSS z namenom, da se kar najboljše posnemajo dejanske razmere pri uporabi omrežij.



Slika 71: Seznam proizvodov RTK v Leica GNSS Spider Network Serverju in nastavitve proizvoda RTK, ki omogoča samodejno izbiro najbližje referenčne postaje.

Figure 71: RT products tab in Leica GNSS Spider Network Server shows configured RTK products. Dialog box shows detailed settings of nearest RTK product.

Leica GNSS Spider omogoča za tip popravkov RTCM 3.x izbiro kompaktnih ali razširjenih sporočil ter interval pošiljanja koordinat referenčne postaje »Coord. rate« (privzeto 5 s), podatkov o referenčni postaji »Info rate« (privzeto 60 s), opazovanj (glavne) referenčne postaje (sporočili 1003 ali 1004) »Data rate« (privzeto 1 s), disperznih in nedisperznih razlik popravkov »Iono and Geo rate« (privzeto 5 s) ter možnost pošiljanja efemerid (privzeto izključeno).

V primeru lastnega omrežja je bil nastavljen zapis podatkov »RTCM 3.x (Extended)« s privzetimi intervali pošiljanja. Iz sprotnih navodil v programu Leica GNSS Spider so povzeta sporočila, ki so vključena v primeru posameznih proizvodov RTK:

- MAX RTCM 3.x (Razširjen): 1004, 1006, 1008, 1013, 1014, 1015, 1016, 1029\*, 1033, v primeru GLONASS pa še 1012 za glavno postajo ter 1037 in 1038; namesto sporočil 1015 in 1016 oziroma 1037 in 1038 se lahko pošiljata tudi kombinirani sporočili 1017 oziroma 1039, če je tako nastavljeno
- i-MAX RTCM 3.x (Razširjen): 1004, 1006, 1008, 1013, 1029\*, 1032, 1033, v primeru GLONASS tudi 1012,
- Virtual RS RTCM 3.x (Razširjen)«: 1004, 1006, 1008, 1013, 1029\*, 1032, 1033, v primeru GLONASS tudi 1012,
- Nearest RTCM 3.x (Razširjen): 1004, 1006, 1008, 1013, 1019\*, 1029\* 1033, v primeru GLONASS tudi 1012 in 1020\*.

\* Sporočila so opsijska. Pošiljajo se samo, če je tako nastavljeno.

#### 4.6 Priprava podatkov za analizo

V sklopu praktične izmere je bilo s štirimi sprejemniki v 11 24-urnih testih zbranih skupaj 4.33 GB podatkov, kar vključuje po 11 delovišč DBX, zbranih na vsakem terenskem kontrolerju, ter po 11 datotek LB2, zbranih na pomnilniških karticah vsakega sprejemnika GNSS. V povprečju je bilo vsako delovišče veliko med 42 in 50 MB. Količine zbranih podatkov LB2 na posameznem sprejemniku so bile med 450 in 850 MB. Tako velike razlike so nastale zaradi različne količine referenčnih podatkov, ki so jih shranjevali sprejemniki GNSS, pri uporabi proizvodov RTK posamezne postaje ali mrežnih proizvodov.

V deloviščih so se samodejno shranjevale točke z intervalom 1 s. Vsaka shranjena točka poleg imena, datuma in časa in ocene natančnosti vsebuje tudi podatke o uporabljeni storitvi RTK, uporabljeni referenčni postaji ali postajah (v primeru mrežnih storitev), komponentah baznega vektorja, priklonni točki, številu uporabljenih satelitov v rešitvi (število satelitov GPS in GLONASS ter skupno število vseh satelitov), vrednostih GDOP in PDOP, tipu proizvoda RTK ter podatke o celici (oznake glavne in pomožnih referenčnih postaj). Vsako delovišče vsebuje približno 86.000 točk, od katerih jih je približno desetina fazno določenih.

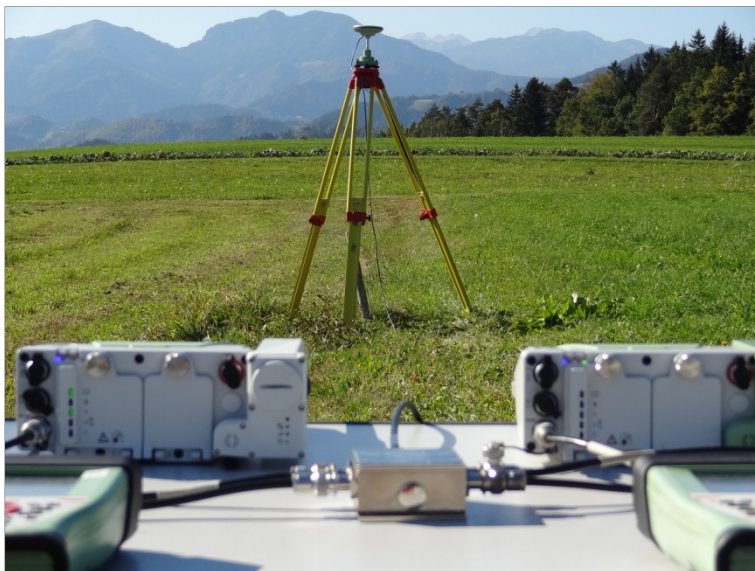
Za potrebe analize zbranih podatkov je bila iz vsakega delovišča pridobljena besedilna datoteka v obliki, ki je primerna za obdelavo s tabelaričnimi programi. Z modulom Format Manager programskega paketa Leica Geo Office je bila ustvarjena formatna datoteka »Debug\_3.frt«, ki jo terenski kontroler lahko uporabi za izvoz podatkov v prilagodljivih besedilnih zapisih.

Primer besedilne datoteke z rezultati meritev:

```
=====
(c) Gregor Bilban, 09/2011
-----
Leica SmartWorx Viva - RTK Debug
=====
Job Info:
-----
Job Name: GS1_5km_Spider
Job Description: MAC TRM
Operator: Gregor
Date: 25.09.2011
Instrument: CS15 #1590163
-----
Coordinate System Info:
-----
Coord. System: ETRS 89/TM
Ellipsoid: GRS 1980
Projection: SLO TM
Transformation: /
Geoid Model: SLOG2000
=====
GNSS Baselines Info:
```



Pri oddaljenostih od najbližje referenčne postaje 5 km in 15 km je bila za navezavo na eno referenčno postajo uporabljena postaja Ljubljana, pri oddaljenosti 30 km pa Slovenj Gradec, torej postaja, ki bi v običajnih razmerah bila izbrana tudi za glavno postajo v primeru mrežnih proizvodov.



Slika 72: Postavitev antene med izvajanjem meritev na testni točki Brdo.

Figure 72: GNSS antenna setup during field measurements on the point Brdo.

Namen testa je bil:

- ugotoviti razlike med dvema mrežnima konceptoma VRS in MAC,
- ugotoviti razlike med mrežno rešitvijo in rešitvijo iz posamezne referenčne postaje, predvsem v smislu, ali navezava na najbližjo referenčno postajo pri kratkem baznem vektorju lahko daje boljše rezultate kot mrežna rešitev, ali je navezava na najbližjo referenčno postajo pri dolgem baznem vektorju lahko alternativa mrežni rešitvi, kadar le-te ni na voljo, ter
- ugotoviti prednosti uporabe opazovanj obeh sistemov GPS in GLONASS glede na uporabo samo opazovanj sistema GPS.

#### **Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km**

##### **- Proizvod RTK: MAC TRM**

|                                         |                  |                |               |
|-----------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>  | 10676            |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>  | 10676            | 100.00%        |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b> | 0                |                |               |
|                                         | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                | 8.1              | 5              | 10            |
| <b>GDOP</b>                             | 2.3              | 1.3            | 4.5           |
|                                         | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>       | 468672.596 m     | 106397.597 m   | 330.353 m     |

Sprejemniki GNSS proizvajalca Leica zahtevajo določitev zapisa referenčnih podatkov, zato takšnih nedoslednosti ne dopuščajo.

|                                              |          |          |          |
|----------------------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.005 m | 0.001 m  | 0.018 m  |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.004 m  | 0.006 m  | 0.010 m  |
| <b>RMS</b>                                   | 0.006 m  | 0.006 m  | 0.021 m  |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.013 m  | 0.022 m  | 0.079 m  |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.024 m | -0.037 m | -0.021 m |

- **Proizvod RTK: VRS TRM**

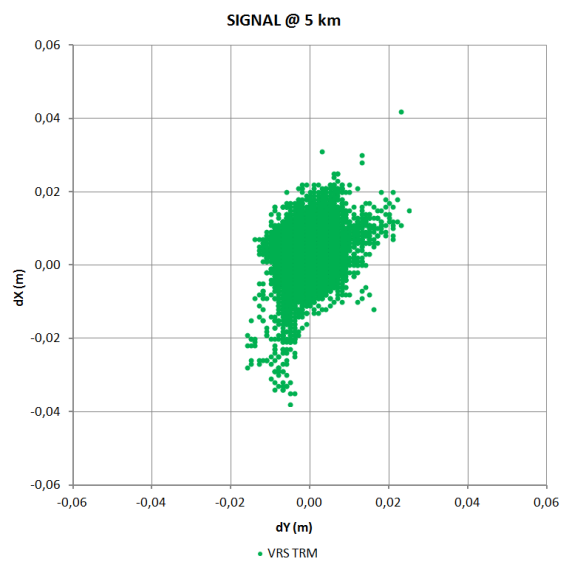
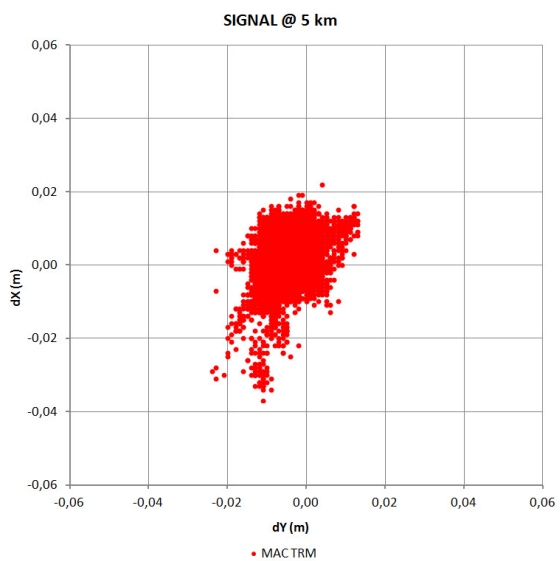
|                                              |                  |                |               |
|----------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>       | 10208            |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>       | 10208            | 100.00%        |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b>      | 0                |                |               |
|                                              | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                     | 8.0              | 5              | 10            |
| <b>GDOP</b>                                  | 2.3              | 1.3            | 13.1          |
|                                              | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 468672.592 m     | 106397.594 m   | 330.346 m     |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.001 m         | 0.004 m        | 0.025 m       |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.005 m          | 0.006 m        | 0.012 m       |
| <b>RMS</b>                                   | 0.005 m          | 0.007 m        | 0.028 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.025 m          | 0.042 m        | 0.074 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.016 m         | -0.038 m       | -0.071 m      |

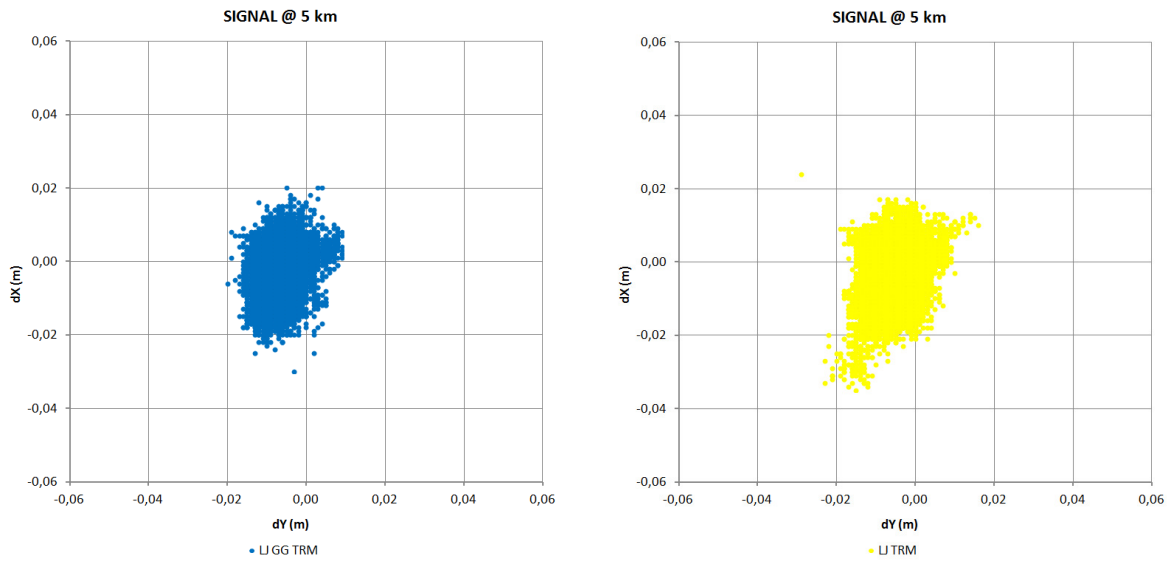
- **Proizvod RTK: LJ GG TRM**

|                                              |                  |                |               |
|----------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>       | 10670            |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>       | 10670            | 100.00%        |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b>      | 0                |                |               |
|                                              | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                     | 14.8             | 7              | 18            |
| <b>GDOP</b>                                  | 1.5              | 1.0            | 4.2           |
|                                              | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 468672.598 m     | 106397.599 m   | 330.372 m     |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.007 m         | -0.001 m       | -0.001 m      |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.004 m          | 0.006 m        | 0.010 m       |
| <b>RMS</b>                                   | 0.008 m          | 0.007 m        | 0.010 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.009 m          | 0.020 m        | 0.038 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.020 m         | -0.030 m       | -0.058 m      |

- **Proizvod RTK: LJ TRM**

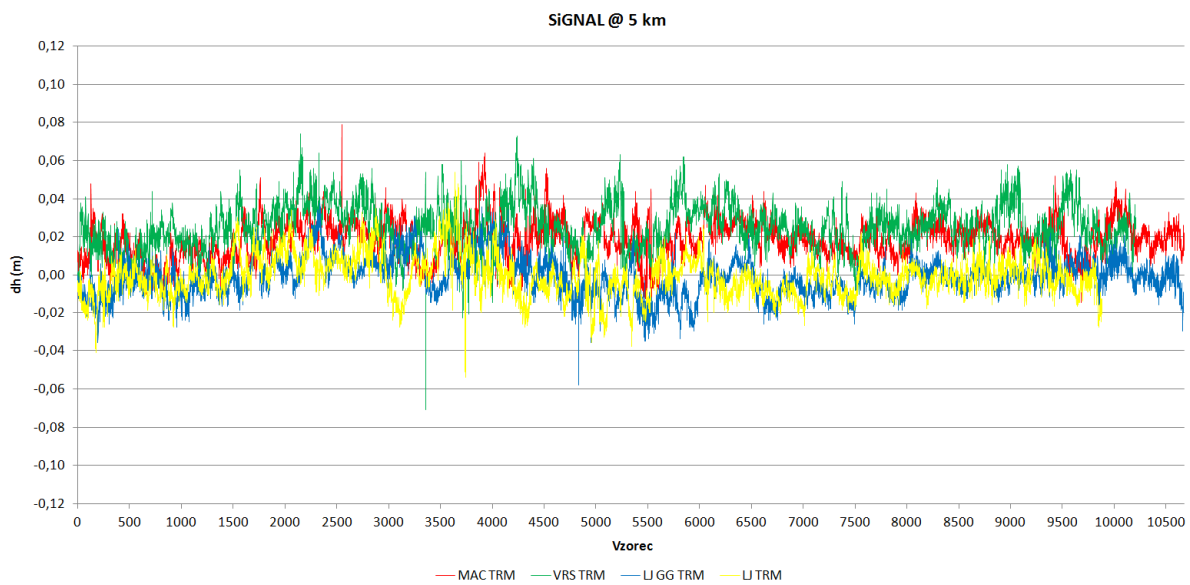
|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9886             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9886             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 8.0           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 468672.597 m     | 106397.600 m   | 330.372 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.006 m         | -0.002 m       | -0.001 m      |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.007 m        | 0.011 m       |
| RMS                                   | 0.008 m          | 0.008 m        | 0.011 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.016 m          | 0.024 m        | 0.054 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.029 m         | -0.035 m       | -0.054 m      |





Slika 73: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Figure 73: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance to the nearest reference station.



Slika 74: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Figure 74: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance to the nearest reference station.

**Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km**

**- Proizvod RTK: MAC TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 8384             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 8377             | 99.92%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 7                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.0              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.4              | 1.4            | 8.9           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.344 m     | 114136.463 m   | 394.282 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.002 m          | 0.003 m        | 0.041 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.009 m        | 0.016 m       |
| RMS                                   | 0.005 m          | 0.009 m        | 0.044 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.043 m          | 0.033 m        | 0.158 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.018 m         | -0.049 m       | -0.010 m      |

**- Proizvod RTK: VRS TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9690             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9690             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.9              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.4              | 1.3            | 8.6           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.344 m     | 114136.461     | 394.288 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.002 m          | 0.005 m        | 0.035 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.006 m          | 0.009 m        | 0.017 m       |
| RMS                                   | 0.006 m          | 0.011 m        | 0.039 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.024 m          | 0.038 m        | 0.098 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.019 m         | -0.047 m       | -0.017 m      |

**- Proizvod RTK: LJ GG TRM**

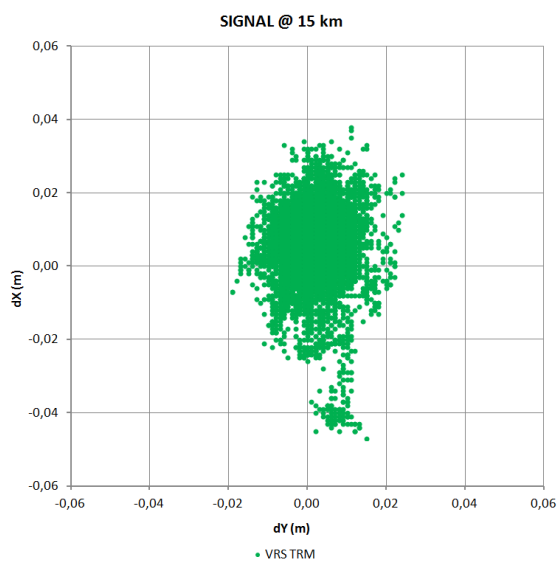
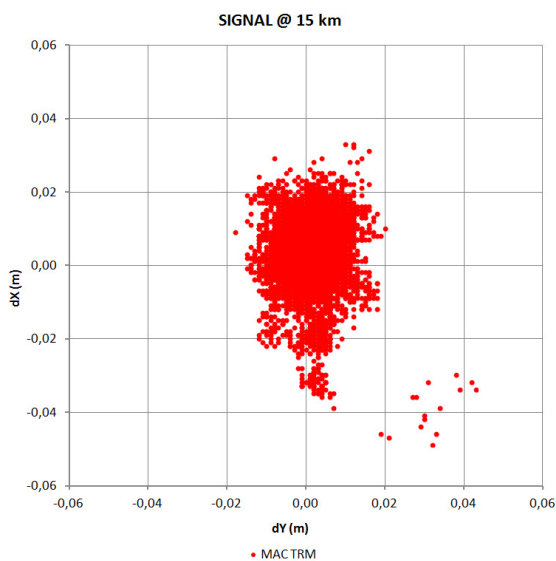
|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 9965             |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 9965             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 0                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |

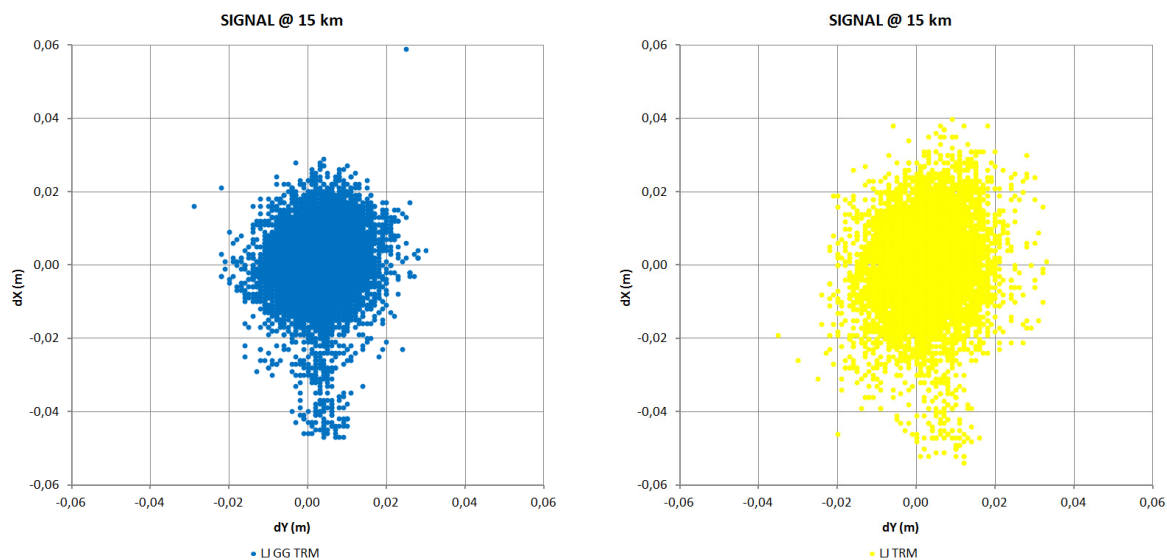


|                                       |              |              |           |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| Število satelitov                     | 13.9         | 6            | 19        |
| GDOP                                  | 1.6          | 1.0          | 6.0       |
|                                       | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.343 m | 114136.466 m | 394.307 m |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.003 m      | 0.000 m      | 0.016 m   |
| Standardna deviacija                  | 0.007 m      | 0.009 m      | 0.022 m   |
| RMS                                   | 0.007 m      | 0.009 m      | 0.027 m   |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.030 m      | 0.059 m      | 0.097 m   |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.029 m     | -0.047 m     | -0.101 m  |

- Proizvod RTK: LJ TRM

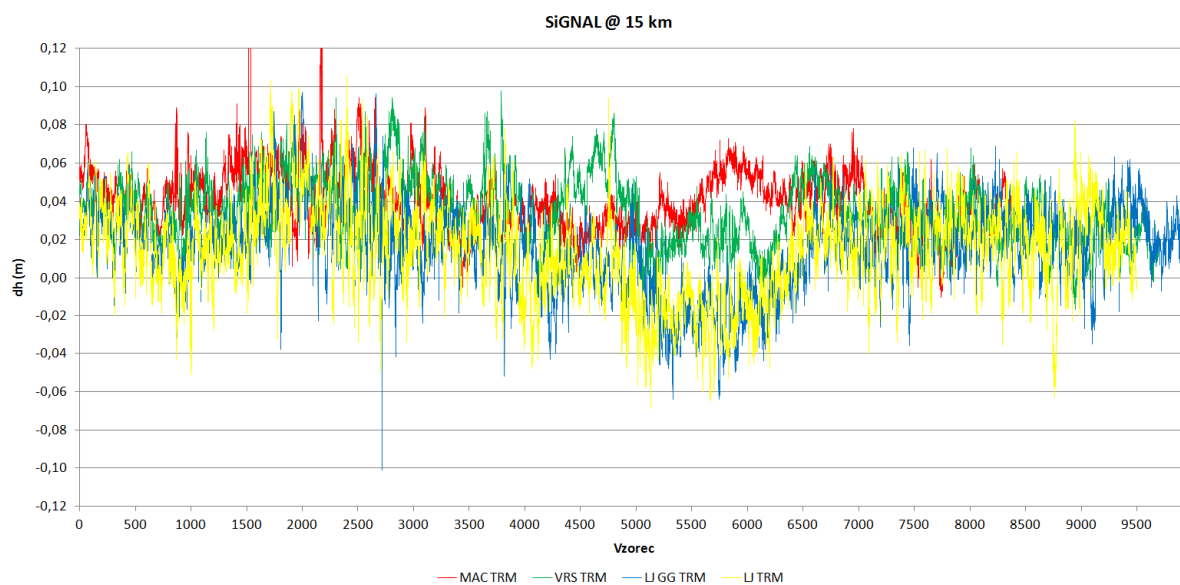
|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9498             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9498             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.0              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 8.6           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.344 m     | 114136.466 m   | 394.309 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.002 m          | 0.000 m        | 0.014 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.008 m          | 0.012 m        | 0.024 m       |
| RMS                                   | 0.008 m          | 0.012 m        | 0.028 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.033 m          | 0.040 m        | 0.106 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.035 m         | -0.054 m       | -0.069 m      |





Slika 75: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

Figure 75: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance to the nearest reference station.



Slika 76: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

Figure 76: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance to the nearest reference station.

*Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km*

- **Proizvod RTK: MAC TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 8237             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 8237             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 8.6           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.565 m     | 128641.219 m   | 506.826 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.008 m         | 0.005 m        | 0.033 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.006 m        | 0.015 m       |
| RMS                                   | 0.010 m          | 0.008 m        | 0.037 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.019 m          | 0.049 m        | 0.134 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.033 m         | -0.034 m       | -0.018 m      |

- **Proizvod RTK: VRS TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 8493             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 8493             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.0              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 5.2           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.565 m     | 128641.217 m   | 506.819 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.008 m         | 0.007 m        | 0.040 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.006 m          | 0.008 m        | 0.016 m       |
| RMS                                   | 0.010 m          | 0.011 m        | 0.043 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.020 m          | 0.048 m        | 0.131 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.034 m         | -0.036 m       | -0.044 m      |

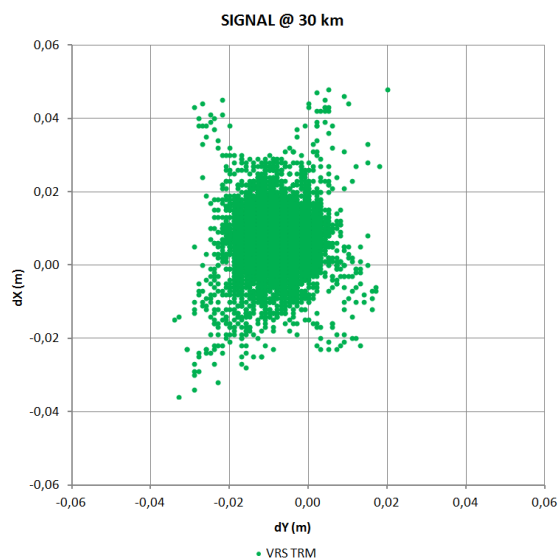
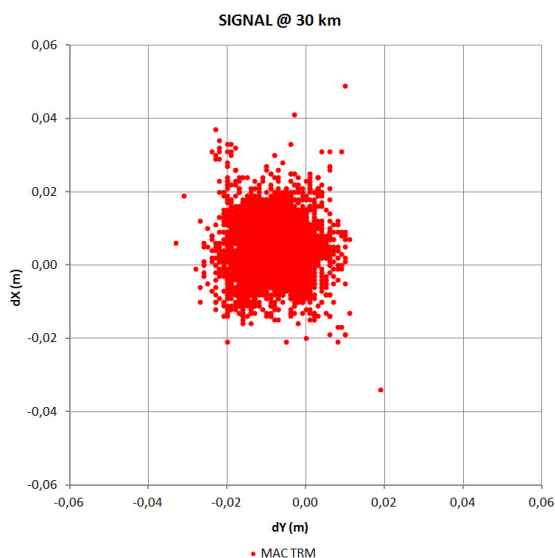
- **Proizvod RTK: SG GG TRM**

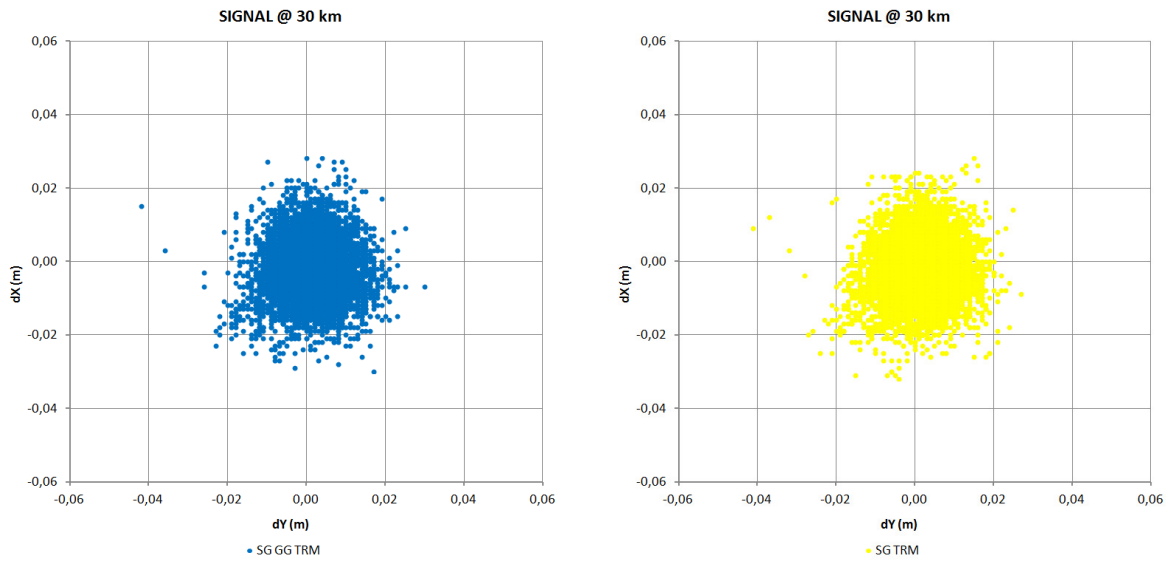
|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 7703             |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 7697             | 99.92%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 6                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |

|                                       |              |              |           |
|---------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| Število satelitov                     | 14.5         | 10           | 19        |
| GDOP                                  | 2.4          | 1.4          | 9.1       |
|                                       | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.555 m | 128641.226 m | 506.835 m |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.002 m      | -0.002 m     | 0.024 m   |
| Standardna deviacija                  | 0.007 m      | 0.008 m      | 0.017 m   |
| RMS                                   | 0.007 m      | 0.008 m      | 0.029 m   |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.030 m      | 0.028 m      | 0.204 m   |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.056 m     | -0.193 m     | -0.058 m  |

- Proizvod RTK: SG TRM

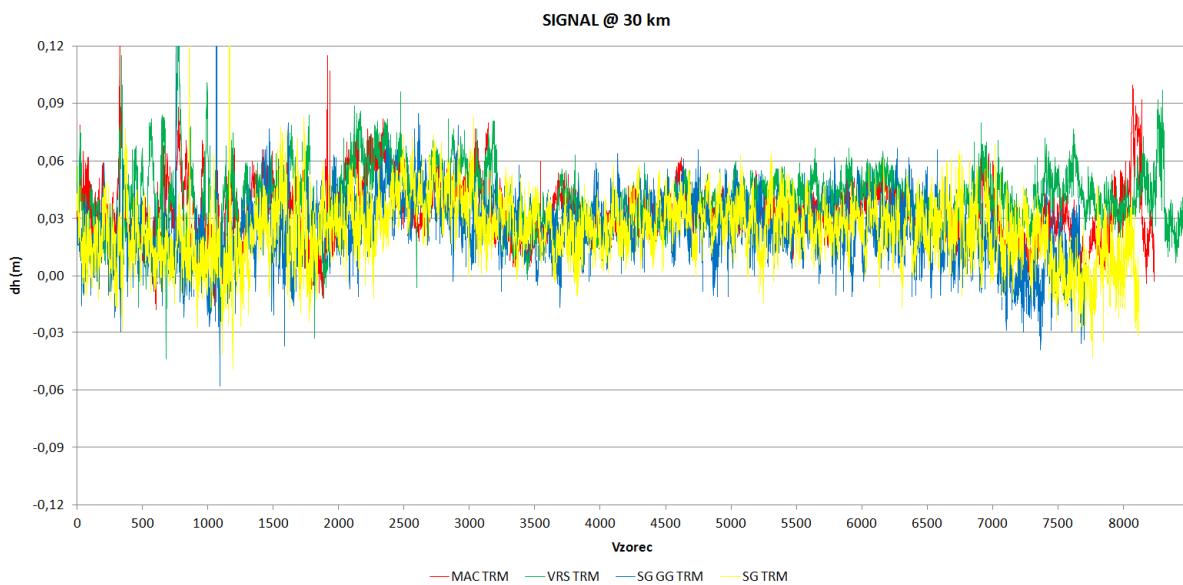
|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 8119             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 8111             | 90.90%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 8                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.9              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.4            | 9.1           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.555 m     | 128641.226 m   | 506.835       |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.002 m          | -0.002 m       | 0.024 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.007 m          | 0.008 m        | 0.017 m       |
| RMS                                   | 0.007 m          | 0.009 m        | 0.029 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.027 m          | 0.028 m        | 0.203 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.047 m         | -0.180 m       | -0.049 m      |





Slika 77: Primerjava položajev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 77: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance to the nearest reference station.



Slika 78: Primerjava višin pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 78: Height errors from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance to the nearest reference station.

#### 4.7.2 Mrežni proizvodi RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja

V drugem testu so bili pri treh različnih oddaljenostih od najbližje referenčne postaje preizkušeni naslednji proizvodi RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja GNSS (navedena so imena priklopnih točk):

- MacSLO [SIGNAL],
- VRSSLO(3\_0) [SIGNAL],
- MAX\_Slovenija [lastno] in
- ViRS\_Slovenija [lastno].

V vseh štirih primerih so bila uporabljena samo opazovanja satelitov GPS, saj zaradi nepopolnega omrežja referenčnih postaj opazovanja GLONASS niso bila vključena v mrežno analizo.

Namen testa je bil:

- ugotoviti razlike med dvema mrežnima konceptoma VRS in MAC,
- ugotoviti razlike med dvema različnima uporabljenima programskima paketoma za mrežno analizo – Leica GNSS Spider in Trimble VRS<sup>3</sup>Net, in sicer predvsem s stališča razlik v kakovosti določitve položaja premičnega sprejemnika pri uporabi mrežnih popravkov MAC. Ker je koncept MAC standardiziran in je modeliranje vplivov v celoti prepuščeno premičnemu sprejemniku, se lahko ugotovljene razlike skoraj v celoti pripiše samo sposobnostim osrednje programske opreme pri določanju fazne nedoločenosti omrežja in vplivov na opazovanja na posamezni referenčni postaji.

#### *Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km*

##### - Proizvod RTK: MAC TRM

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 10657            |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 10657            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.2              | 1.3            | 4.4           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 468672.596 m     | 106397.597 m   | 330.358 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.005 m         | 0.001 m        | 0.013 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.004 m          | 0.006 m        | 0.011 m       |
| RMS                                   | 0.006 m          | 0.007 m        | 0.017 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.008 m          | 0.038 m        | 0.052 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.020 m         | -0.022 m       | -0.031 m      |

- **Proizvod RTK: VRS TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 10301            |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 10301            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.0              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 7.7           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 468672.593 m     | 106397.598 m   | 330.350 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.002 m         | 0.000 m        | 0.021 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.004 m          | 0.007 m        | 0.013 m       |
| RMS                                   | 0.005 m          | 0.007 m        | 0.025 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.015 m          | 0.039 m        | 0.064 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.018 m         | -0.026 m       | -0.037 m      |

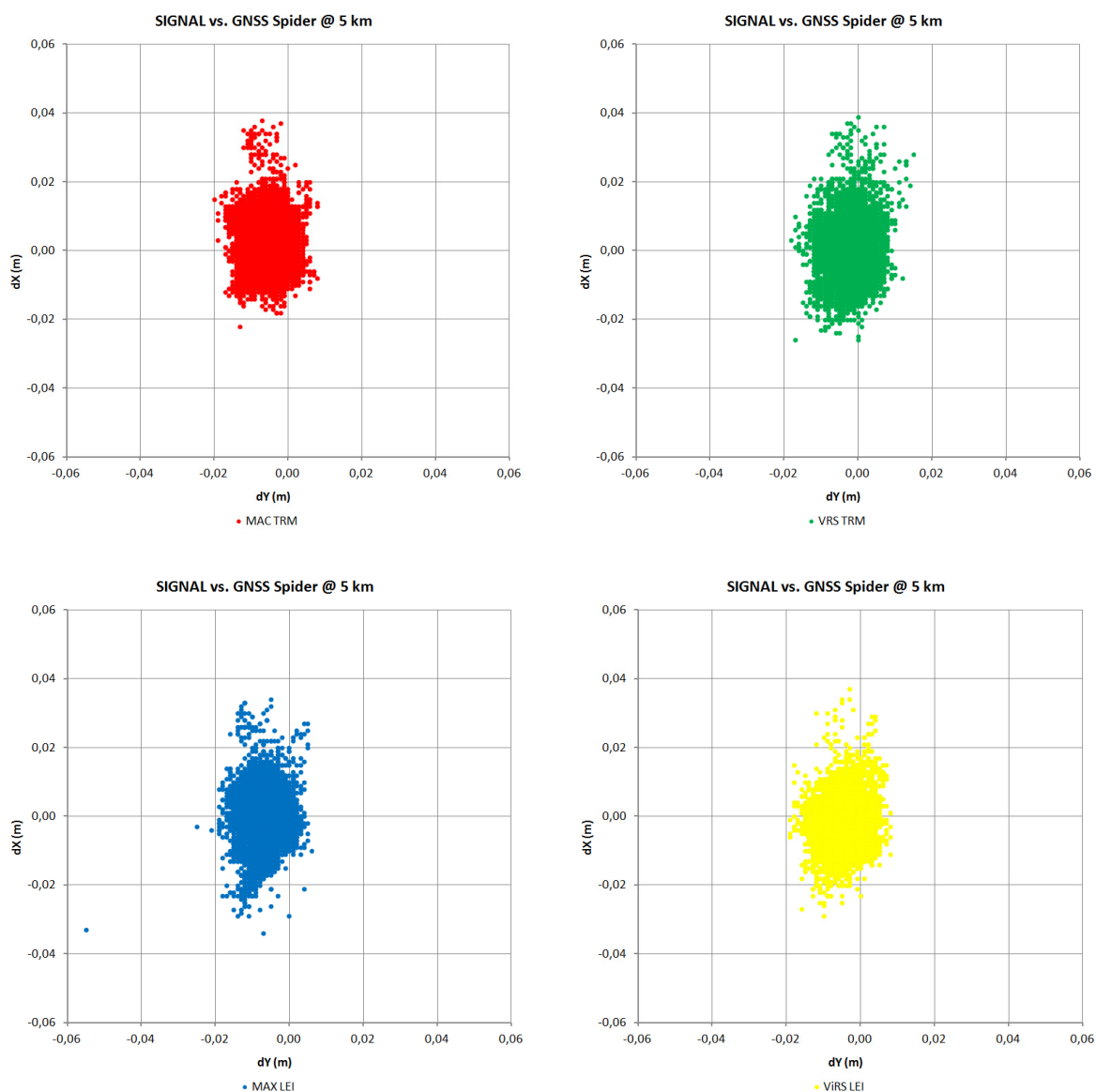
- **Proizvod RTK: MAX LEI**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 10301            |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 10301            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.2              | 1.3            | 4.4           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 468672.598 m     | 106397.598 m   | 330.374 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.007 m         | 0.000 m        | -0.003 m      |
| Standardna deviacija                  | 0.004 m          | 0.006 m        | 0.011 m       |
| RMS                                   | 0.008 m          | 0.006 m        | 0.011 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.006 m          | 0.034 m        | 0.149 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.055 m         | -0.034 m       | -0.053 m      |

- **Proizvod RTK: ViRS LEI**

|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 10502            |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 10502            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 0                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                | 7.7              | 5              | 10            |
| GDOP                             | 2.5              | 1.5            | 5.5           |

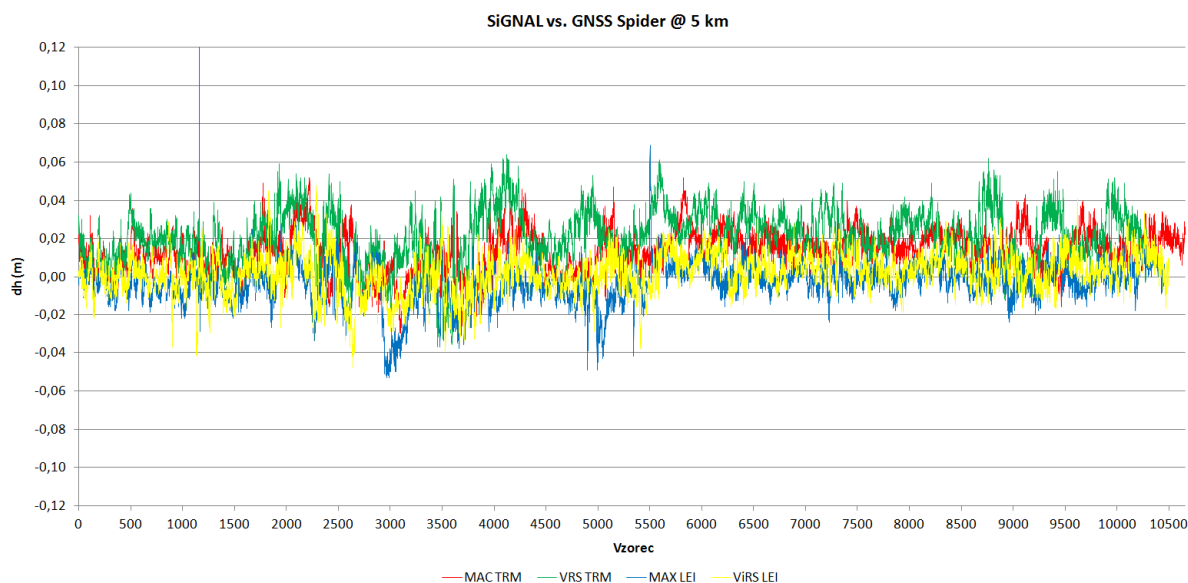
|                                              | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 468672.595 m | 106397.601 m | 330.369 m |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.004 m     | -0.003 m     | 0.002 m   |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.004 m      | 0.006 m      | 0.010 m   |
| <b>RMS</b>                                   | 0.005 m      | 0.007 m      | 0.011 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.008 m      | 0.037 m      | 0.048 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.019 m     | -0.029 m     | -0.048 m  |



Slika 79: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Figure 79: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance to the nearest reference station.





Slika 80: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Figure 80: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance to the nearest reference station.

### Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km

#### - Proizvod RTK: MAC TRM

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9562             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9562             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 5.8           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.346 m     | 114136.461 m   | 394.274 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.000 m          | 0.005 m        | 0.049 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.004 m          | 0.008 m        | 0.015 m       |
| RMS                                   | 0.004 m          | 0.009 m        | 0.051 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.019 m          | 0.037 m        | 0.105 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.017 m         | -0.035 m       | -0.027 m      |

- **Proizvod RTK: VRS TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 10039            |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 10039            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.0              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 7.7           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.346 m     | 114136.458 m   | 394.282 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | 0.000 m          | 0.008 m        | 0.041 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.009 m        | 0.018 m       |
| RMS                                   | 0.005 m          | 0.012 m        | 0.045 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.022 m          | 0.045 m        | 0.123 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.021 m         | -0.036 m       | -0.031 m      |

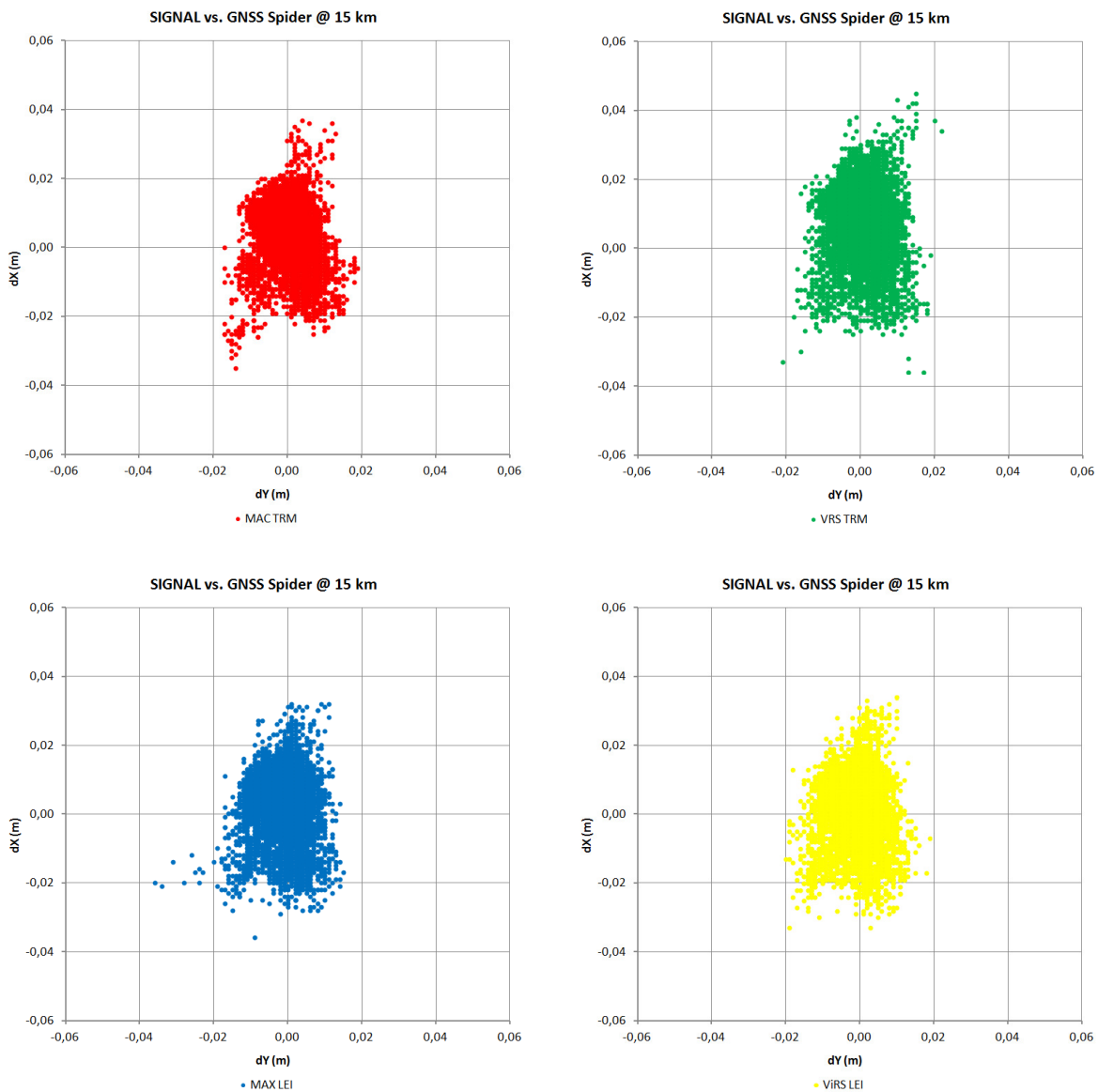
- **Proizvod RTK: MAX LEI**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9768             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9768             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 8.1              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.3              | 1.3            | 7.7           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 475011.347 m     | 114136.463 m   | 394.297 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.001 m         | 0.003 m        | 0.026 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.008 m        | 0.015 m       |
| RMS                                   | 0.005 m          | 0.009 m        | 0.030 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.015 m          | 0.032 m        | 0.105 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.036 m         | -0.036 m       | -0.027 m      |

- **Proizvod RTK: ViRS LEI**

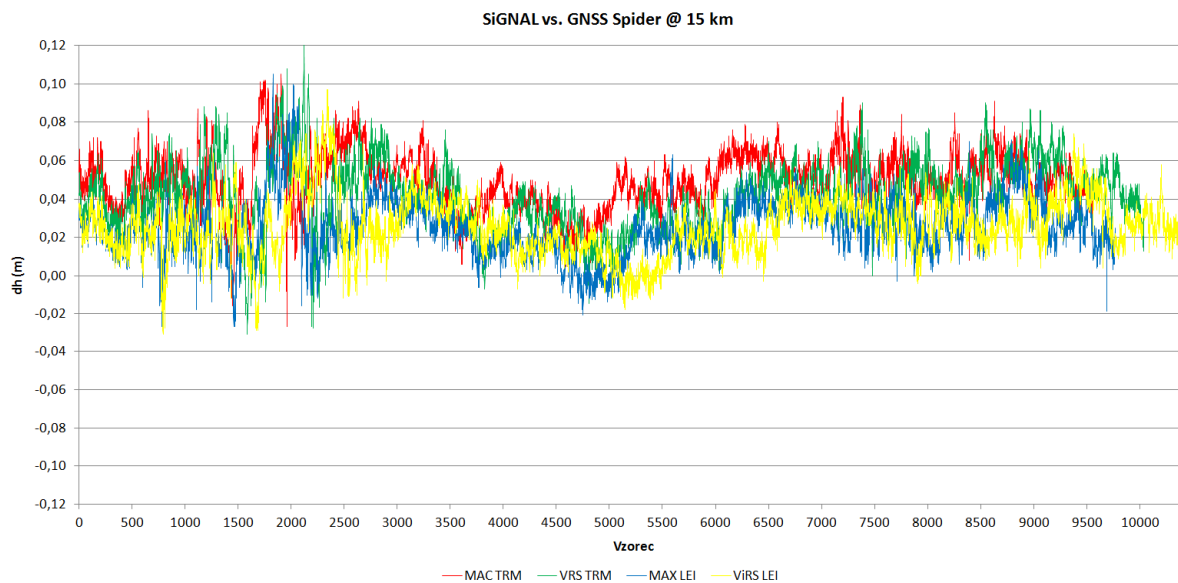
|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 10429            |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 10429            | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 0                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                | 7.9              | 5              | 10            |
| GDOP                             | 2.4              | 1.5            | 5.8           |

|                                              | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 475011.347 m | 114136.463 m | 394.297 m |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.001 m     | 0.003 m      | 0.026 m   |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.005 m      | 0.008 m      | 0.015 m   |
| <b>RMS</b>                                   | 0.005 m      | 0.009 m      | 0.030 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.019 m      | 0.034 m      | 0.097 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.020 m     | -0.033 m     | -0.031 m  |



Slika 81: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

*Figure 81: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance to the nearest reference station.*



Slika 82: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

Figure 82: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance to the nearest reference station.

### Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km

#### - Proizvod RTK: MAC TRM

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 7499             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 7490             | 99.88%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 9                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.4              | 5              | 9             |
| GDOP                                  | 2.6              | 1.5            | 17.3          |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.569 m     | 128641.217 m   | 506.832 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.012 m         | 0.007 m        | 0.027 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.008 m          | 0.009 m        | 0.022 m       |
| RMS                                   | 0.015 m          | 0.011 m        | 0.035 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.077 m          | 0.112 m        | 0.194 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.147 m         | -0.182 m       | -0.073 m      |

- **Proizvod RTK: VRS TRM**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 7813             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 7776             | 99.53%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 37               |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.4              | 5              | 9             |
| GDOP                                  | 2.5              | 1.4            | 17.3          |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.569 m     | 128641.216 m   | 506.824 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.012 m         | 0.008 m        | 0.035 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.009 m          | 0.010 m        | 0.028 m       |
| RMS                                   | 0.015 m          | 0.013 m        | 0.045 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.058 m          | 0.101 m        | 0.287 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.156 m         | -0.186 m       | -0.080 m      |

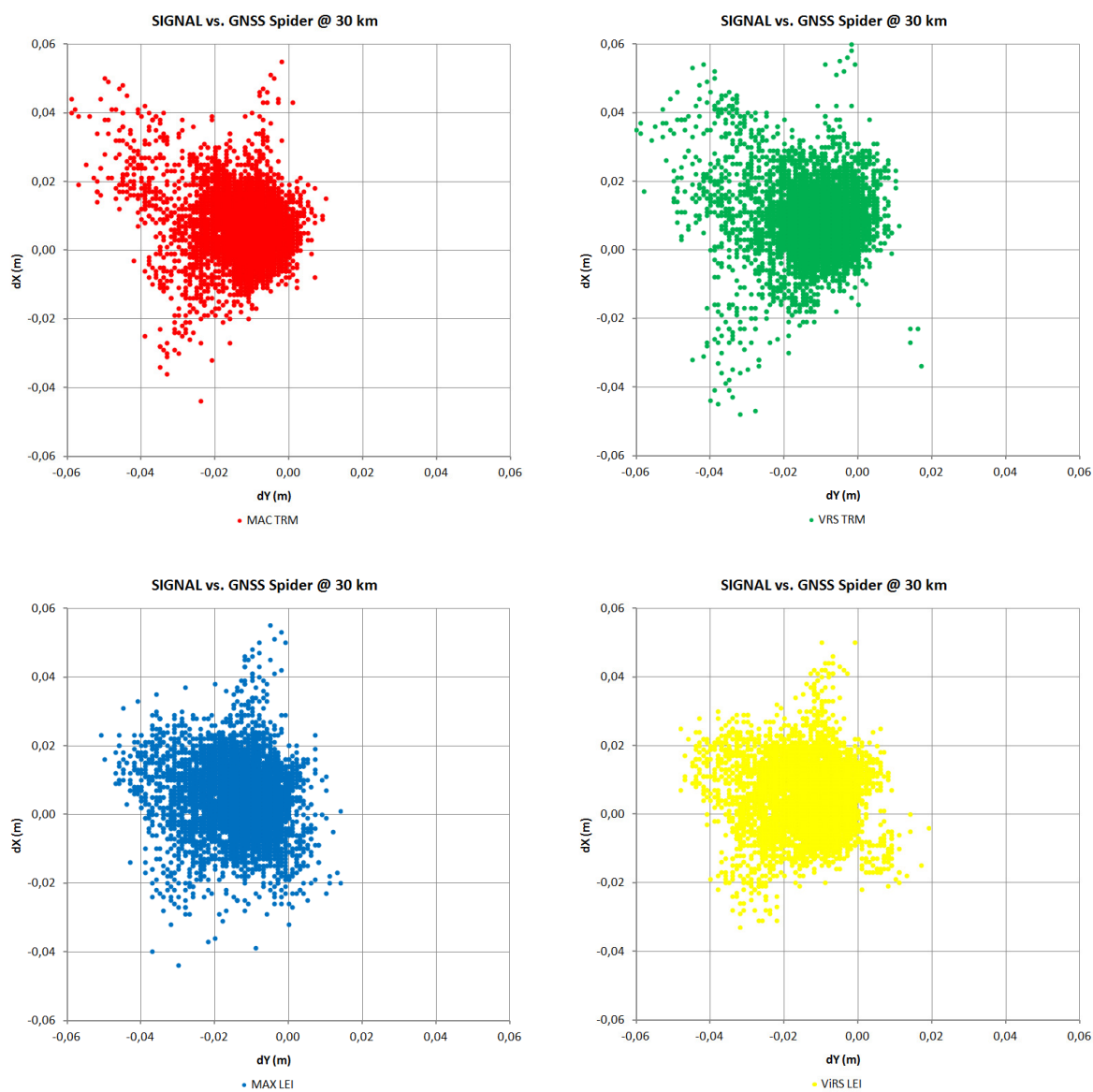
- **Proizvod RTK: MAX LEI**

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 9045             |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 9045             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.4              | 5              | 10            |
| GDOP                                  | 2.6              | 1.5            | 17.7          |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 491038.569 m     | 128641.220 m   | 506.853 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.012 m         | 0.004 m        | 0.006 m       |
| Standardna deviacija                  | 0.008 m          | 0.009 m        | 0.021 m       |
| RMS                                   | 0.015 m          | 0.010 m        | 0.021 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.014 m          | 0.104 m        | 0.104 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.053 m         | -0.081 m       | -0.049 m      |

- **Proizvod RTK: ViRS LEI**

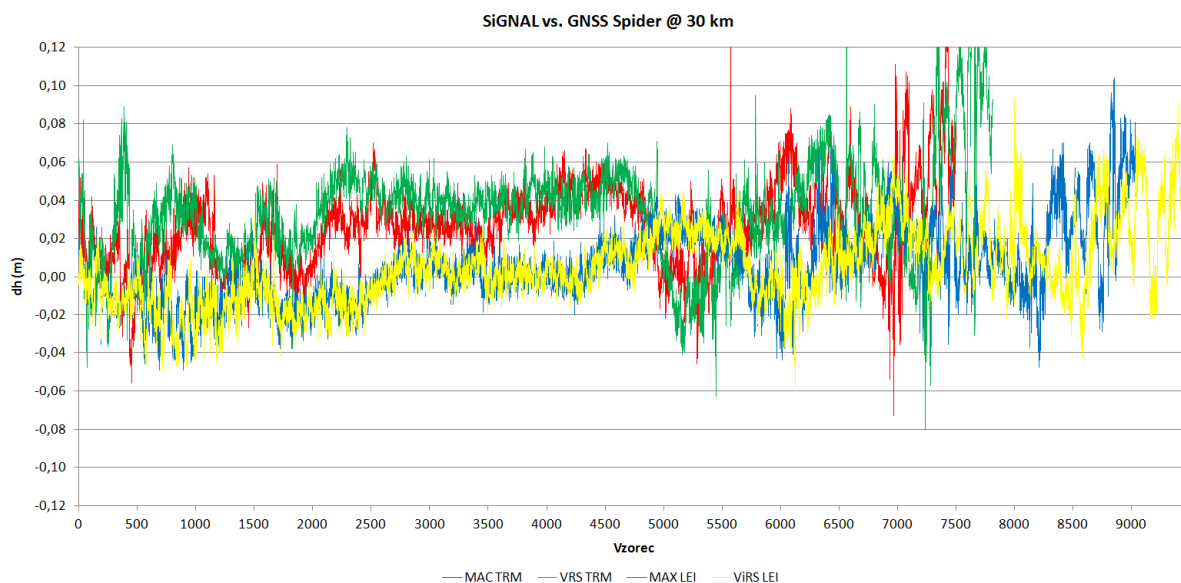
|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 9498             |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 9498             | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 0                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                | 7.5              | 5              | 10            |
| GDOP                             | 2.4              | 1.5            | 6.0           |

|                                              | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 491038.569 m | 128641.220 m | 506.853 m |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.012 m     | 0.004 m      | 0.006 m   |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.008 m      | 0.008 m      | 0.020 m   |
| <b>RMS</b>                                   | 0.015 m      | 0.009 m      | 0.021 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.019 m      | 0.050 m      | 0.093 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.048 m     | -0.033 m     | -0.057 m  |



Slika 83: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 83: Position scatter from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance to the nearest reference station.



Slika 84: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL ter lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 84: Height errors from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance to the nearest reference station.

#### 4.7.3 Proizvodi RTK lastnega omrežja

V tretjem testu so bili pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km preizkušeni naslednji proizvodi RTK lastnega omrežja (navedena so imena priklopnih točk):

- Nearest [lastno],
- i-MAX\_Slovenija [lastno],
- MAX\_Slovenija [lastno] in
- ViRS\_Slovenija [lastno].

V vseh štirih primerih so bila uporabljena samo opazovanja satelitov GPS.

Namen testa je bil:

- ugotoviti razlike med štirimi različnimi tipi mrežnih proizvodov RTK, ki jih omogoča programski paket Leica GNSS Spider, pri največji oddaljenosti od najbližje referenčne postaje ter
- ugotoviti primernost uporabe najbližje referenčne postaje pri dolgem baznem vektorju.

#### Rezultati meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km

- **Proizvod RTK: NEAREST LEI**

|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 7312             |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 7311             | 99.99%         |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 1                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                | 7.4              | 5              | 10            |
| GDOP                             | 2.4              | 1.4            | 9.0           |

|                                              | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 491038.565 m | 128641.234 m | 506.832 m |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.008 m     | -0.010 m     | 0.027 m   |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.007 m      | 0.009 m      | 0.022 m   |
| <b>RMS</b>                                   | 0.011 m      | 0.013 m      | 0.034 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.019 m      | 0.032 m      | 0.225 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.075 m     | -0.070 m     | -0.147 m  |

- **Proizvod RTK: i-MAX LEI**

|                                              |                  |                |               |
|----------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>       | 8266             |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>       | 8265             | 99.99%         |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b>      | 1                |                |               |
|                                              | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                     | 7.6              | 4              | 9             |
| <b>GDOP</b>                                  | 2.4              | 1.5            | 8.6           |
|                                              | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 491038.567 m     | 128641.222 m   | 506.843 m     |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.010 m         | 0.002 m        | 0.016 m       |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.006 m          | 0.007 m        | 0.018 m       |
| <b>RMS</b>                                   | 0.012 m          | 0.008 m        | 0.024 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.016 m          | 0.037 m        | 0.157 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.053 m         | -0.053 m       | -0.062 m      |

- **Proizvod RTK: MAX LEI**

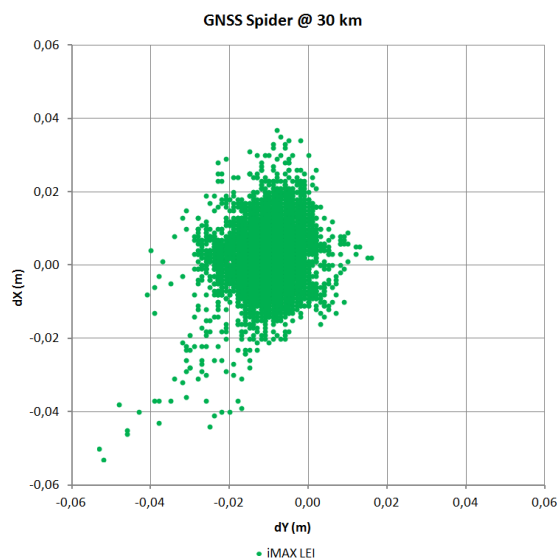
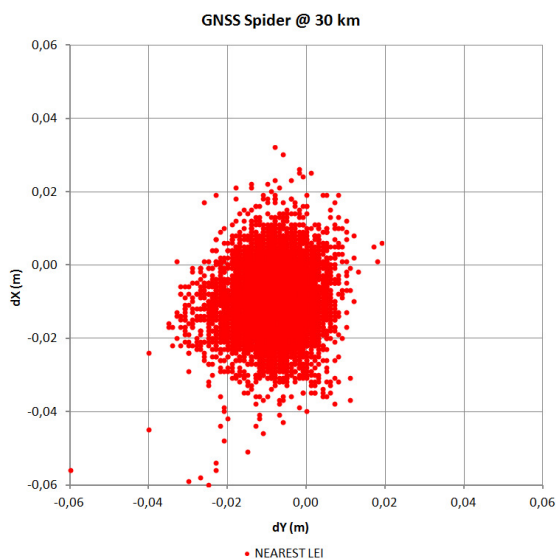
|                                              |                  |                |               |
|----------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>       | 8429             |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>       | 8429             | 100.00%        |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b>      | 0                |                |               |
|                                              | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                     | 7.6              | 5              | 10            |
| <b>GDOP</b>                                  | 2.4              | 1.4            | 8.7           |
|                                              | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 491038.566 m     | 128641.223 m   | 506.842 m     |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.009 m         | 0.001 m        | 0.017 m       |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.006 m          | 0.007 m        | 0.018 m       |
| <b>RMS</b>                                   | 0.011 m          | 0.007 m        | 0.025 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.021 m          | 0.036 m        | 0.139 m       |

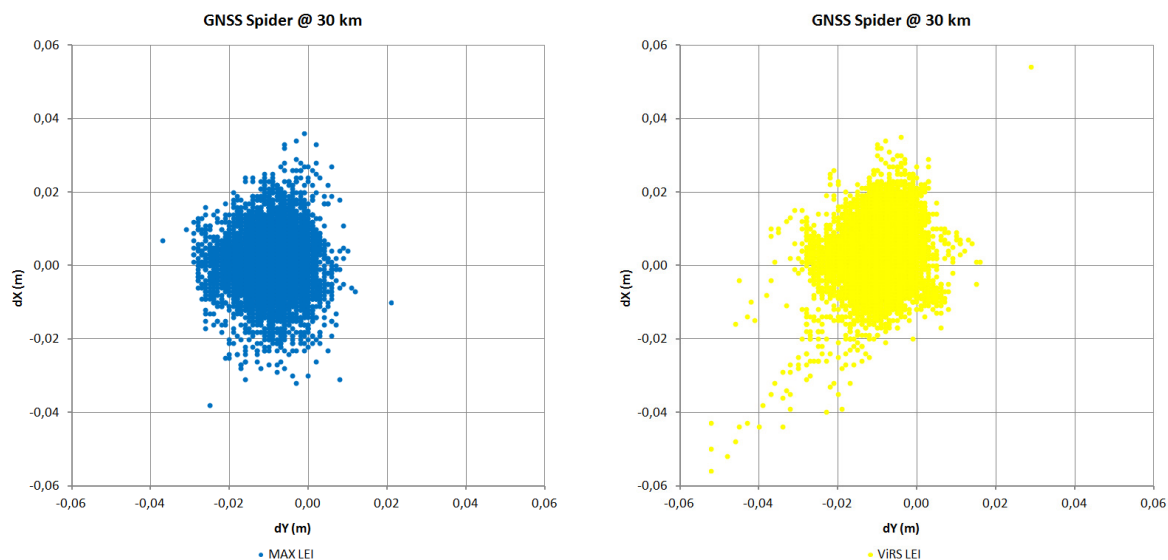


|                                        |          |          |          |
|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b> | -0.037 m | -0.038 m | -0.078 m |
|----------------------------------------|----------|----------|----------|

- **Proizvod RTK: ViRS LEI**

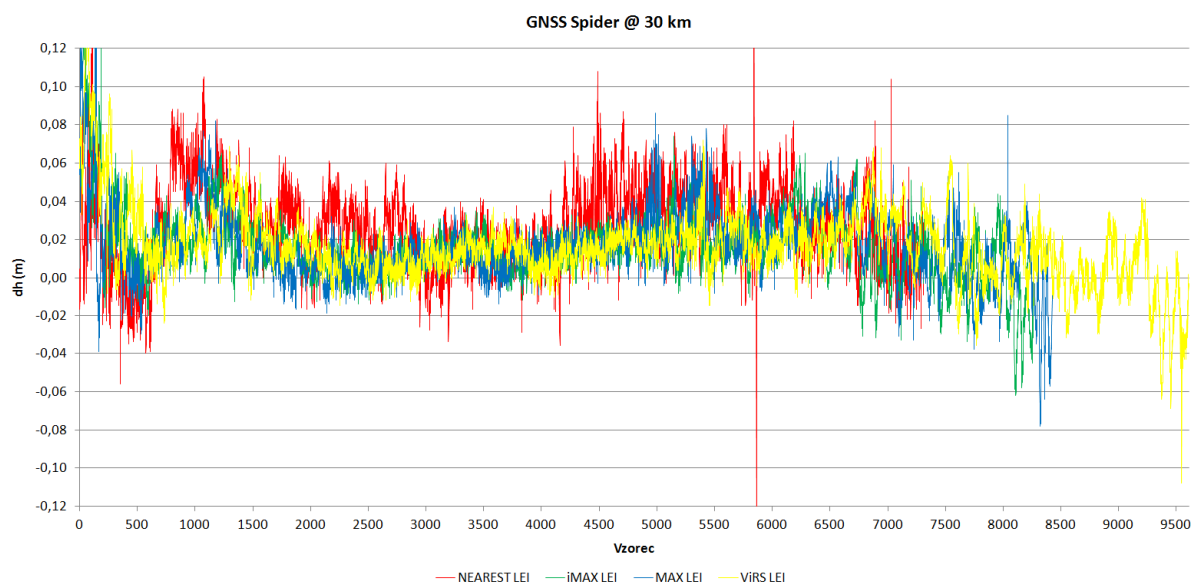
|                                              |                  |                |               |
|----------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| <b>Število fazno določenih meritev</b>       | 9609             |                |               |
| <b>Število in delež točnih meritev</b>       | 9608             | 99.99%         |               |
| <b>Število grobo pogrešenih meritev</b>      | 1                |                |               |
|                                              | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| <b>Število satelitov</b>                     | 7.5              | 5              | 9             |
| <b>GDOP</b>                                  | 2.4              | 1.5            | 9.9           |
|                                              | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 491038.567 m     | 128641.222 m   | 506.843 m     |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.010 m         | 0.002 m        | 0.016 m       |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.006 m          | 0.008 m        | 0.019 m       |
| <b>RMS</b>                                   | 0.011 m          | 0.008 m        | 0.025 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.029 m          | 0.054 m        | 0.151 m       |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.052 m         | -0.056 m       | -0.108 m      |





Slika 85: Primerjava položajev pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 85: Position scatter from different RTK products of own network at 30 km distance to the nearest reference station.



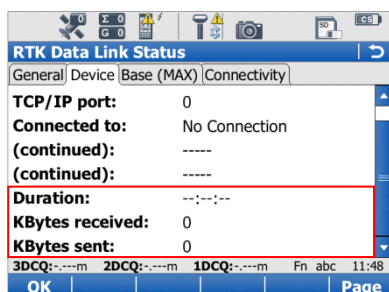
Slika 86: Primerjava višin pri uporabi različnih mrežnih proizvodov RTK lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 86: Height errors from different RTK products of own network at 30 km distance to the nearest reference station.

#### 4.7.4 Pasovna širina, potrebna za prenos referenčnih podatkov

Večina storitev RTK v sodobnih omrežjih GNSS temelji na paketnem prenosu podatkov v mobilnih omrežjih z uporabo protokola NTRIP. V takšnih omrežjih se stroški komunikacije plačujejo po dejanski količini prenesenih podatkov in ne po času trajanja vzpostavljene komunikacije. Zato je bila v magistrskem delu izmerjena tudi količina prenesenih podatkov iz omrežja GNSS ter ocenjena potrebna pasovna širina v primeru različnih proizvodov RTK.

Količino prenesenih podatkov ter čas trajanja povezave sprejemnik Leica Viva GS10 prikazuje v pogovornem oknu o stanju podatkovne povezave, kot to prikazuje slika 87. Med terensko izmero so se ti podatki ročno beležili, nato pa so bile izračunane povprečne količine prenesenih podatkov, ki so osnova za oceno potrebne pasovne širine in s tem stroškov komunikacije. Rezultati so prikazani v preglednici 23.



Slika 87: Prikaz stanja podatkovne povezave na zaslonu terenskega kontrolerja.

Figure 87: RTK data link status shown on the field controller.

K celotni količini prenesenih podatkov prispevajo tudi sporočila NMEA GGA, ki jih premični sprejemnik Leica Viva GS10 vsakih 5 sekund pošilja v omrežje GNSS. Količina teh podatkov je majhna, saj znaša le 60 KB/h, kar pomeni zanemarljivih 137 bps.

Preglednica 23: Povprečne količine sprejetih in poslanih podatkov RTK ter ocena pasovne širine.

Table 23: Average amount of sent and received RTK data and required bandwidth estimation.

| Omrežje | Proizvod RTK      | Sprejeti podatki [KB] | Poslani podatki [KB] | Čas [dan] | Povprečna količina sprejetih podatkov [KB/h] | Povprečna količina poslanih podatkov [KB/h] | Pasovna širina [bps] |
|---------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| SIGNAL  | MacSLO            | 328184                | 7343                 | 5.11875   | 2671                                         | 60                                          | 6215                 |
| SIGNAL  | VRSSLO(3_0)       | 190216                | 7758                 | 5.40833   | 1465                                         | 60                                          | 3471                 |
| SIGNAL  | LJ/SG_GLONAS(3_1) | 55043                 | 0                    | 2.32638   | 986                                          | 0                                           | 2243                 |
| Lastno  | MAX_Slovenija     | 92504                 | 5439                 | 3.79236   | 1016                                         | 60                                          | 2449                 |
| Lastno  | ViRS_Slovenija    | 50467                 | 5158                 | 3.60069   | 584                                          | 60                                          | 1465                 |
| Lastno  | Nearest           | 14341                 | 1411                 | 0.98402   | 607                                          | 60                                          | 1518                 |
| Lastno  | i-MAX_Slovenija   | 13125                 | 1404                 | 0.98333   | 556                                          | 59                                          | 1401                 |

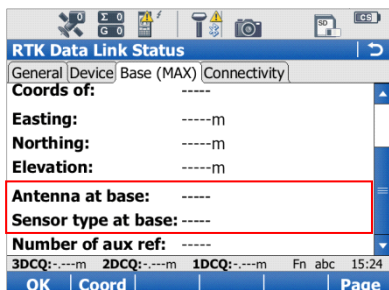
V vseh primerih proizvodov RTK v obeh omrežjih je bil uporabljen zapis podatkov RTCM 3, zato so potrebne pasovne širine neposredno primerljive.

#### 4.7.5 Vsebina sporočil RTK

Da premični sprejemnik lahko kakovostno in zanesljivo določi neznan število celih valov nosilnega signala, mora poznati tip sprejemnika, tip antene ter kalibracijske podatke o anteni, uporabljeni na referenčni postaji. Standardni zapis podatkov RTCM 3.x omogoča vključitev sporočil o uporabljenem tipu sprejemnika in antene, ki jih premični sprejemnik razbere ter nato ustrezno uporabi podatke o odmikih in variacijah faznih centrov ter medkanalnih zakasnitvah. Oznake tipov sprejemnikov in anten morajo biti zaradi medopravnosti skladni z dogovorom o poimenovanju sprejemnikov, anten in antenskih pokrovov (ang. Radome) organizacije IGS<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Dogovor o poimenovanju sprejemnikov, anten in antenskih pokrovov je na voljo na spletni strani organizacije International GNSS Service, [http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/rcvr\\_ant.tab](http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/rcvr_ant.tab).

Med terensko izmero so se beležili podatki o uporabljenih tipih sprejemnikov in anten, kot jih je premični sprejemnik GNSS razbral iz sprejetih sporočil RTK (slika 88). Rezultati so prikazani v preglednici 24, kjer je z barvo označena tudi pravilnost vsebine (rdeča – napačno, rumena – verjetno pravilno, zelena – pravilno).



Slika 88: Podatki o referenčni postaji, ki jih premični sprejemnik razbere iz sporočil RTK, na zaslonu terenskega kontrolerja.

Figure 88: Reference station data extracted from RTK messages shown on the field controller.

Preglednica 24: Podatki o referenčni postaji, kot jih je iz sporočil RTCM dekodiral premični sprejemnik.

Table 24: Reference station data decoded from RTCM streams.

| Omrežje | Proizvod RTK    | Testna točka | Podatki o referenčni postaji |                 |                       |                              |                               |
|---------|-----------------|--------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|
|         |                 |              | Ime točke                    | Koordinate      | Višina antene         | Tip antene                   | Tip sprejemnika               |
| SIGNAL  | MacSLO          | Šentjakob    | RTCM-Ref 0001                | Marker          | 0.000 m <sup>24</sup> | Neznano                      | GRX1200 GG Pro                |
| SIGNAL  | MacSLO          | Šentvid      | RTCM-Ref 0001                | Marker          | 0.000 m               | Neznano                      | GRX1200 GG Pro                |
| SIGNAL  | MacSLO          | Brdo         | RTCM-Ref 0005                | Marker          | 0.000 m               | Neznano                      | Trimble                       |
| SIGNAL  | VRSSLO(3_0)     | Šentjakob    | RTCM-Ref 0536                | Marker          | 0.000 m               | Neznano                      | Neznano                       |
| SIGNAL  | VRSSLO(3_0)     | Šentvid      | RTCM-Ref 0957                | Marker          | 0.000 m               | Neznano                      | Neznano                       |
| SIGNAL  | VRSSLO(3_0)     | Brdo         | RTCM-Ref 0877                | Marker          | 0.000 m               | Neznano                      | Neznano                       |
| SIGNAL  | LJ_GLONAS(3_1)  | Šentjakob    | RTCM-Ref 0001                | ? <sup>25</sup> | ?                     | GPPNULLANTENNA <sup>26</sup> | Neznano (GS10 <sup>27</sup> ) |
| SIGNAL  | LJ_GLONAS(3_1)  | Šentvid      | RTCM-Ref 0001                | ?               | ?                     | GPPNULLANTENNA               | Neznano (GS10 <sup>31</sup> ) |
| SIGNAL  | SG_GLONAS(3_1)  | Brdo         | RTCM-Ref 0005                | Marker          | 0.000 m               | GPPNULLANTENNA               | Neznano                       |
| Lastno  | MAX_Slovenija   | Šentjakob    | RTCM-Ref 0021                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | GRX1200 GG Pro                |
| Lastno  | MAX_Slovenija   | Šentvid      | RTCM-Ref 0021                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | GRX1200 GG Pro                |
| Lastno  | MAX_Slovenija   | Brdo         | RTCM-Ref 0024                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | Trimble                       |
| Lastno  | ViRS_Slovenija  | Šentjakob    | RTCM-Ref 0135                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | GRX1200 GG Pro                |
| Lastno  | ViRS_Slovenija  | Šentvid      | RTCM-Ref 0258                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | GRX1200 GG Pro                |
| Lastno  | ViRS_Slovenija  | Brdo         | RTCM-Ref 0039                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | Trimble                       |
| Lastno  | Nearest         | Brdo         | RTCM-Ref 0024                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | Trimble                       |
| Lastno  | i-MAX_Slovenija | Brdo         | RTCM-Ref 0024                | Marker          | 0.065 m               | GPPNULLANTENNA               | Trimble                       |

Omrežje SIGNAL oddaja točne podatke o uporabljenih antenah samo v primeru proizvodov najbližjih referenčnih postaj. Zaradi tega se pričakuje tudi sistematičen pogrešek določitve višine s premičnim sprejemnikom v primeru mrežnih proizvodov RTK. Točne podatke o uporabljenih sprejemnikih pa

<sup>24</sup> Iz primerjave koordinat referenčne postaje, ki so zapisane v sporočilih RTCM, v primeru uporabe storitve MacSLO omrežja SIGNAL in MAX\_Slovenija lastnega omrežja, je bilo ugotovljeno, da Leica GNSS Spider pošilja nastavljene koordinate (koordinate markerja, stabilizacije) ter višino antene na referenčni postaji (sporočilo 1006), Trimble VRS<sup>3</sup>Net pa oddaja koordinate antene z že upoštevano višino antene (koordinate ARP, sporočilo 1005) in zato je podatek o višini antene 0.000 m.

<sup>25</sup> Podatek na terenu ni bil zabeležen.

<sup>26</sup> Pravilnosti podatka ni bilo mogoče preveriti, vendar se sklepa, da je pravilen.

<sup>27</sup> V primeru, da je bilo na premičnem sprejemniku nastavljeno sledenje tudi satelitov GLONASS, je instrument interpretiral tip sprejemnika na referenčni postaji kot GS10, sicer je bil prikazan tip neznan.

omrežje SIGNAL oddaja samo v primeru mrežnega proizvoda MacSLO. V nobenem od preskušanih primerov sprejeti podatki niso popolni in točni.

Leica GNSS Spider v lastnem omrežju je v vseh primerih oddajal popolne in točne podatke o uporabljenih antenah in sprejemnikih na referenčni postaji. Ker GNSS Spider uporablja absolutne antenske kalibracije, so vsa opazovanja reducirana na ARP, zato se v sporočilih RTCM pošilja podatek o ničelni anteni GPPNULLANTENNA.

Vsebina sporočil RTK je bila dodatno preverjena tudi v podatkih LB2. Referenčni podatki so bili s programom ViewLB2 pretvorjeni v zapis Rinex, kjer se je preverila glava datoteke. Za primer je vzeta točka Brdo, na kateri je bil dejansko uporabljen referenčni sprejemnik Trimble Net R5:

- omrežje SIGNAL, proizvod MacSLO

```

3.01 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
ViewLB2 v1.3.6.0 LEICA GEOSYSTEMS 20121006 171608 LCL PGM / RUN BY / DATE
RefId 5 MARKER NAME
REF_ MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
TRIMBLE NETR5 REC # / TYPE / VERS
ADVNULLANTENNA NONE ANT # / TYPE
4246111.3515 1144100.8495 4604923.5649 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 6 L1C L2W C1C C2W S1C S2W SYS / # / OBS TYPES
2011 10 1 12 8 29.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2011 10 1 23 4 9.0000000 GPS TIME OF LAST OBS

```

- omrežje SIGNAL, proizvod VRSSLO(3\_0)

```

3.01 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
ViewLB2 v1.3.6.0 LEICA GEOSYSTEMS 20121006 171910 LCL PGM / RUN BY / DATE
RefId 32 49 52 54 59 61 64 MARKER NAME
REF_ MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
ADVNULLANTENNA NONE REC # / TYPE / VERS
ANT # / TYPE
4266705.3725 1133981.4845 4588516.8707 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 6 L1C L2W C1C C2W S1C S2W SYS / # / OBS TYPES
R 6 L1C L2P C1C C2P S1C S2P SYS / # / OBS TYPES
2011 10 1 12 8 31.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2011 10 2 12 48 25.0000000 GPS TIME OF LAST OBS

```

- lastno omrežje, proizvod MAX\_Slovenija

```

3.01 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
ViewLB2 v1.3.6.0 LEICA GEOSYSTEMS 20121006 170615 LCL PGM / RUN BY / DATE
RefId 8 24 MARKER NAME
REF_ MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
TRIMBLE NETR5 4.03 REC # / TYPE / VERS
GPPNULLANTENNA ANT # / TYPE
4246111.3512 1144100.8495 4604923.5644 APPROX POSITION XYZ
0.0649 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 9 L1C L2X L2W C1C C2X C2W S1C S2X S2W SYS / # / OBS TYPES
2011 10 1 12 8 33.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2011 10 2 8 57 49.0000000 GPS TIME OF LAST OBS

```

- lastno omrežje, proizvod ViRS\_Slovenija

```
3.01 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
ViewLB2 v1.3.6.0 LEICA GEOSYSTEMS 20121006 172144 LCL PGM / RUN BY / DATE
RefId 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 503 MARKER NAME
REF_ MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
TRIMBLE NETR5 4.03 REC # / TYPE / VERS
GPPNULLANTENNA ANT # / TYPE
4266707.7080 1133981.6031 4588518.7138 APPROX POSITION XYZ
0.0649 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 9 L1C L2X L2W C1C C2X C2W S1C S2X S2W SYS / # / OBS TYPES
2011 10 1 12 8 41.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2011 10 2 12 48 34.0000000 GPS TIME OF LAST OBS
```



Slika 89: Daljinski dostop do programske opreme Leica GNSS Spider je med terensko izmero omogočal takojšnje diagnosticiranje morebitnih težav.

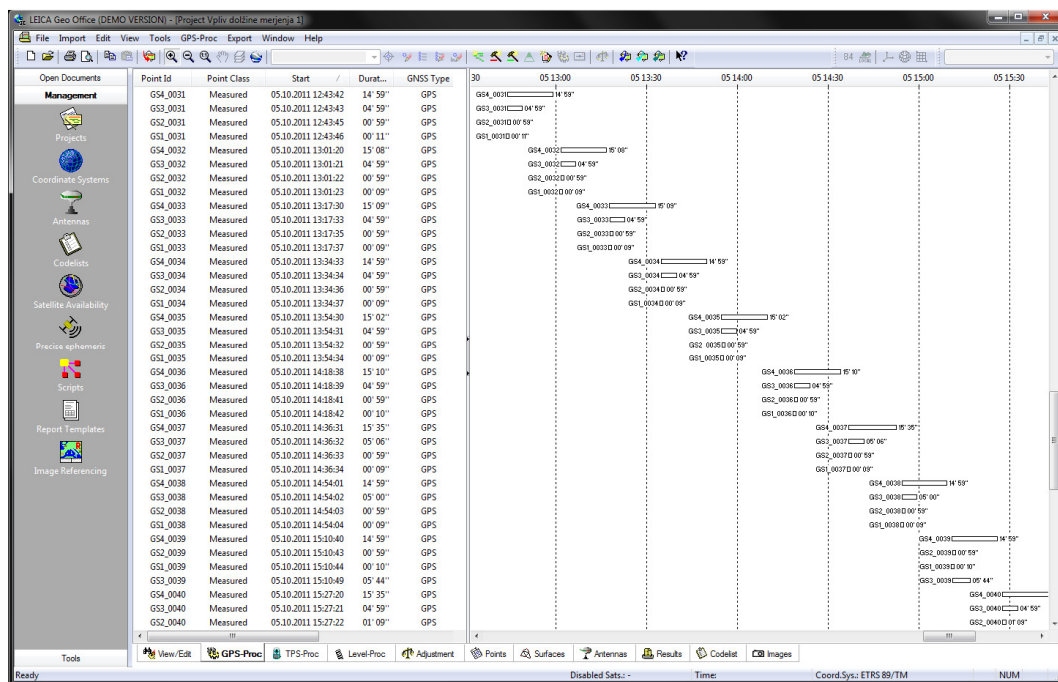
*Figure 89: Remote access allowed author a complete insight into the network activity in case of unpredicted problems with rover positioning during field tests.*

#### 4.7.6 Vpliv dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja

V četrtem testu so na testni točki Arnače vsi štirje sprejemniki uporabljali isti mrežni proizvod lastnega omrežja MAX\_Slovenija. Sledenje signalov GLONASS je bilo izključeno. Pri testu se je na vseh sprejemnikih hkrati ročno vzpostavljala povezava RTK. Ko je bila na vseh sprejemnikih na voljo fazna določena rešitev, se je ročno sprožila meritve. Sprejemniki so bili nastavljeni tako, da so meritve samodejno ustavili po 10 sekundah (spodnja meja za meritve RTK GNSS po navodilih za izvedbo izmere GNSS (Mozetič in sod., 2006)), 1 minuti, 5 minutah in 15 minutah ter shranili rezultate.

Meritve so se izvajale 04.10.2012, od 10:00 do 13:30, in 05.10.2012, od 6:00 do 19:00. Z vsakim sprejemnikom je bilo opravljenih 52 meritev RTK.





Slika 90: Zbrane meritve pri testu vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja, prikazane v programu Leica Geo Office.

Figure 90: Leica Geo Office software shows measurements collected during field test of the influence of measurement interval.

Namen testa je bil ugotoviti, kako čas trajanja meritve na točki vpliva na kakovost določitve položaja.

### Rezultati meritev na testni točki Arnače

#### - Trajanje meritve: 10 s

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 52               |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 52               | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.1              | 5              | 9             |
| GDOP                                  | 3.0              | 1.7            | 7.6           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 508486.242 m     | 133192.972 m   | 439.944 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.006 m         | 0.017 m        | -0.025 m      |
| Standardna deviacija                  | 0.007 m          | 0.014 m        | 0.024 m       |
| RMS                                   | 0.009 m          | 0.022 m        | 0.034 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.008 m          | 0.065 m        | 0.023 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.021 m         | -0.013 m       | -0.099 m      |

- Trajanje meritve: 1 minuta

|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 52               |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 52               | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.2              | 5              | 9             |
| GDOP                                  | 3.0              | 1.7            | 7.5           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 508486.242 m     | 133192.972 m   | 439.945 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.006 m         | 0.017 m        | -0.026 m      |
| Standardna deviacija                  | 0.006 m          | 0.014 m        | 0.022 m       |
| RMS                                   | 0.008 m          | 0.022 m        | 0.034 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.007 m          | 0.067 m        | 0.022 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.019 m         | -0.010 m       | -0.089 m      |

- Trajanje meritve: 5 minut

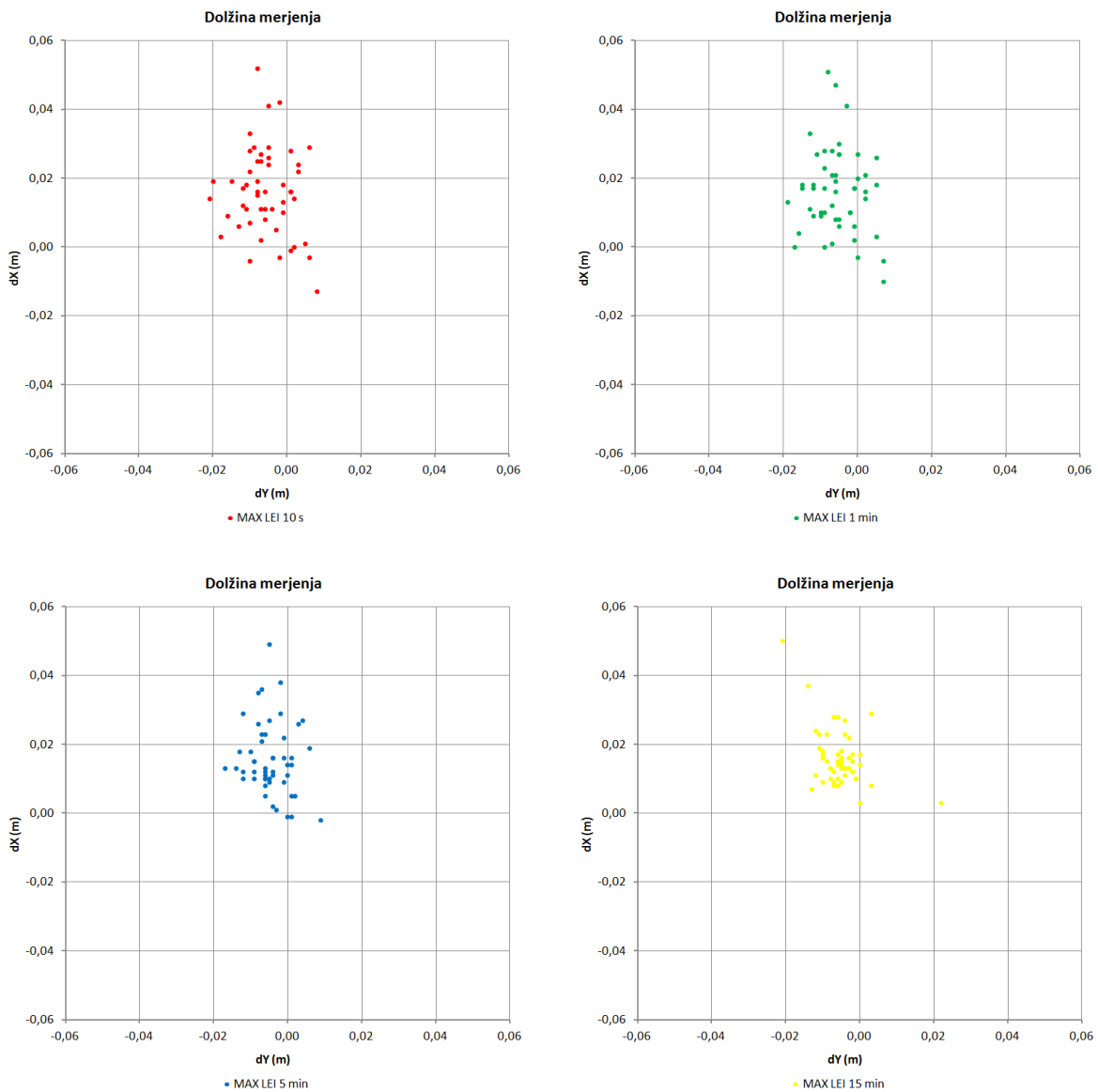
|                                       |                  |                |               |
|---------------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev       | 52               |                |               |
| Število in delež točnih meritev       | 52               | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev      | 0                |                |               |
|                                       | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                     | 7.3              | 6              | 9             |
| GDOP                                  | 2.9              | 1.8            | 7.7           |
|                                       | <b>Y</b>         | <b>X</b>       | <b>h</b>      |
| Srednja vrednost koordinat            | 508486.241 m     | 133192.972 m   | 439.946 m     |
| Odstopanje sredine od prave vrednosti | -0.005 m         | 0.017 m        | -0.027 m      |
| Standardna deviacija                  | 0.005 m          | 0.012 m        | 0.019 m       |
| RMS                                   | 0.007 m          | 0.021 m        | 0.033 m       |
| Največje odstopanje meritve (+)       | 0.009 m          | 0.065 m        | 0.020 m       |
| Največje odstopanje meritve (-)       | -0.018 m         | -0.002 m       | -0.079 m      |

- Trajanje meritve: 15 minut

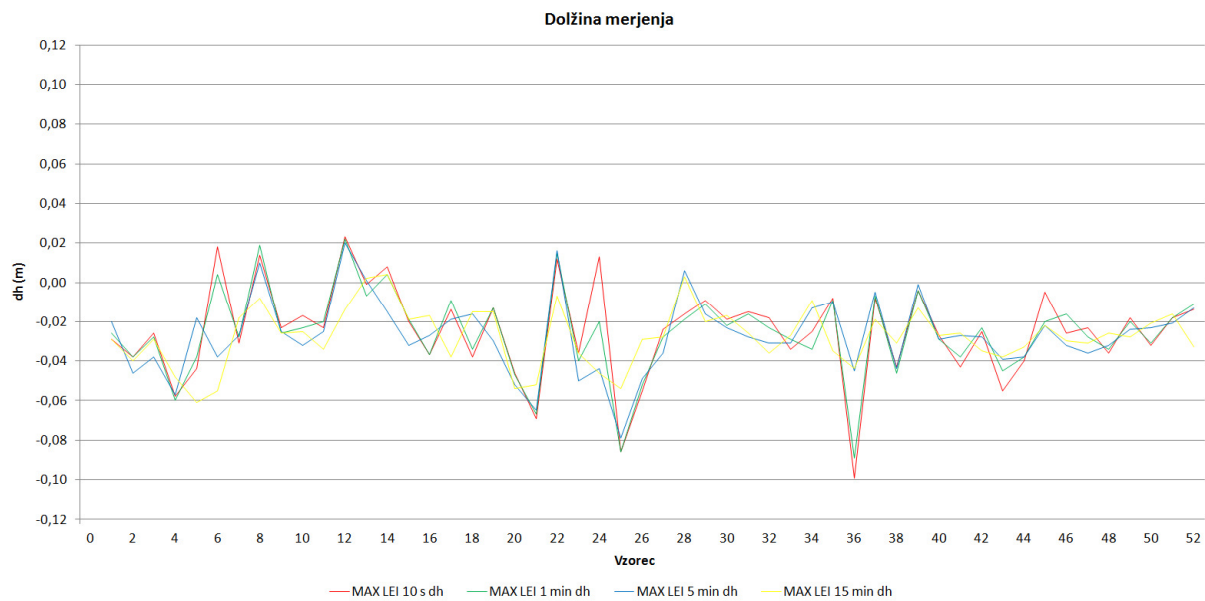
|                                  |                  |                |               |
|----------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Število fazno določenih meritev  | 52               |                |               |
| Število in delež točnih meritev  | 52               | 100.00%        |               |
| Število grobo pogrešenih meritev | 0                |                |               |
|                                  | <b>Povprečno</b> | <b>Najmanj</b> | <b>Največ</b> |
| Število satelitov                | 7.3              | 5              | 9             |
| GDOP                             | 3.0              | 1.7            | 8.6           |



|                                              | <b>Y</b>     | <b>X</b>     | <b>h</b>  |
|----------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <b>Srednja vrednost koordinat</b>            | 508486.241 m | 133192.973 m | 439.947 m |
| <b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b> | -0.005 m     | 0.016 m      | -0.028 m  |
| <b>Standardna deviacija</b>                  | 0.006 m      | 0.008 m      | 0.015 m   |
| <b>RMS</b>                                   | 0.008 m      | 0.018 m      | 0.031 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (+)</b>       | 0.022 m      | 0.050 m      | 0.004 m   |
| <b>Največje odstopanje meritve (-)</b>       | -0.021 m     | 0.003 m      | -0.061 m  |



Slika 91: Primerjava položajev pri različnih dolžinah trajanja meritve.  
Figure 91: Position scatter at different lengths of measurement interval.



Slika 92: Primerjava višine pri različnih dolžinah trajanja meritve.

Figure 92: Height errors at different lengths of measurement interval.

--- Ta stran je namenoma prazna ---

## 5 ANALIZA

Rezultati posameznih testov so se primerjali s stališča točnosti in natančnosti glede na razdaljo do najbližje referenčne postaje in uporabljeni proizvod RTK. Poleg natančnosti in točnosti položaja se je primerjalo tudi število fazno določenih meritev, povprečen čas za inicializacijo ter število grobo pogrešenih določitvev položaja. Večje število neodvisnih inicializacij nakazuje večjo razpoložljivost in zanesljivost in je dejansko najpomembnejši dejavnik zagotavljanja produktivnosti izmere RTK-GNSS.

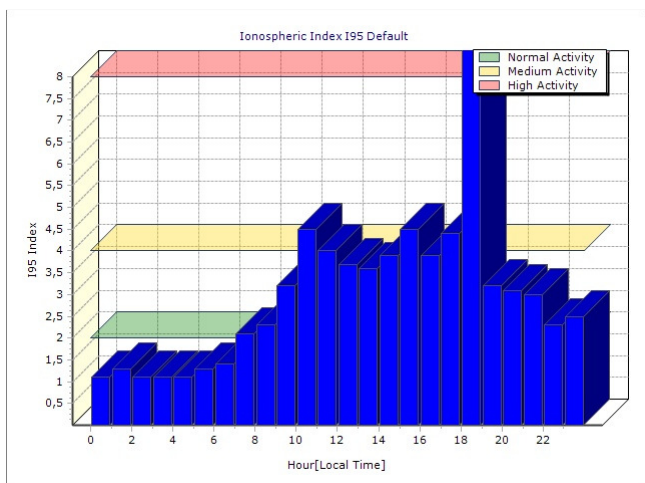
### 5.1.1 Primerjava proizvodov RTK omrežja SIGNAL

V tem testu so se primerjali proizvodi RTK omrežja SIGNAL, in sicer MAC, VRS, najbližja referenčna postaja (Ljubljana oziroma Slovenij Gradec) z upoštevanjem opazovanj GPS in GLONASS ter najbližja referenčna postaja z upoštevanjem samo opazovanj GPS.

V primeru proizvoda LJ/SG GG TRM je opazno med 74% in 83% večje število uporabljenih satelitov in najnižje vrednosti faktorjev DOP. Pri vseh ostalih proizvodih so bili uporabljeni samo sateliti GPS. Zaradi večjega števila satelitov in visoke stopnje koreliranosti vplivov na opazovanja pri najkrajši oddaljenosti od referenčne postaje so bili izmerjeni položaji, ki po kakovosti dosegajo ali presegajo mrežno rešitev, kar je potrdilo predpostavljeno domnevo. V primeru LJ GG TRM je bilo tudi število fazno določenih meritev praktično največje tako pri 5 km kot pri 15 km baznem vektorju (pri dolžini baznega vektorja 5 km je bilo število fazno določenih meritev 10670, kar je le 6 manj kot v primeru proizvoda MAC TRM). Posebej očitna je tudi prispevek satelitov GLONASS, ki tudi pri 15 km baznem vektorju pripomore k za več kot 33% višji natančnosti določitve koordinate X položaja glede na rezultate z uporabo samo GPS. Vpliv dodatnih opazovanj GLONASS je povzet v poglavju *Prednosti uporabe satelitov GLONASS*.

Pri dolgem baznem vektorju so se potrdila pričakovanja o večji kakovosti določitve položaja z uporabo mrežnih proizvodov. Pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km v primeru uporabe mrežnih proizvodov ni bilo grobo pogrešenih meritev, vendar pa 6 oziroma 8 v primeru proizvodov SG GG TRM oziroma SG TRM.

V rezultatih izstopa nepričakovano najmanjše število fazno določenih meritev in kar 7 grobo pogrešenih meritev v primeru proizvoda MAC TRM pri oddaljenost 15 km od najbližje referenčne postaje. Vzrok prvi ugotovitvi je najverjetneje v izpadu komunikacije RTK, saj je bilo pri tem sprejemniku zabeleženih največ prekinitev. Hkrati pa je bila v času izvajanja meritev povečana aktivnost ionosfere. Večina grobo pogrešenih meritev se je namreč zgodila med 17. in 18. uro, tik predno je ionosferska aktivnost dosegla vrh z visoko stopnjo aktivnosti, kot to prikazuje slika 93.



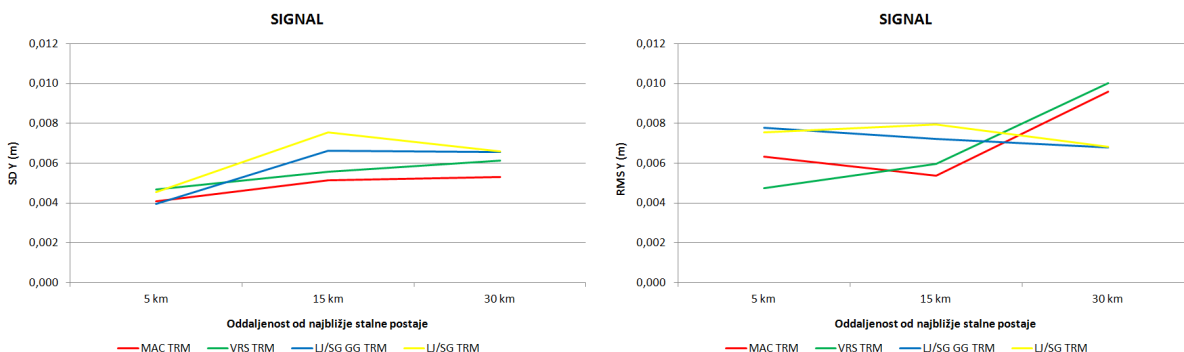
Slika 93: Aktivnost ionosfere na dan 17.09.2011. Pridobljeno na portalu omrežja SIGNAL.

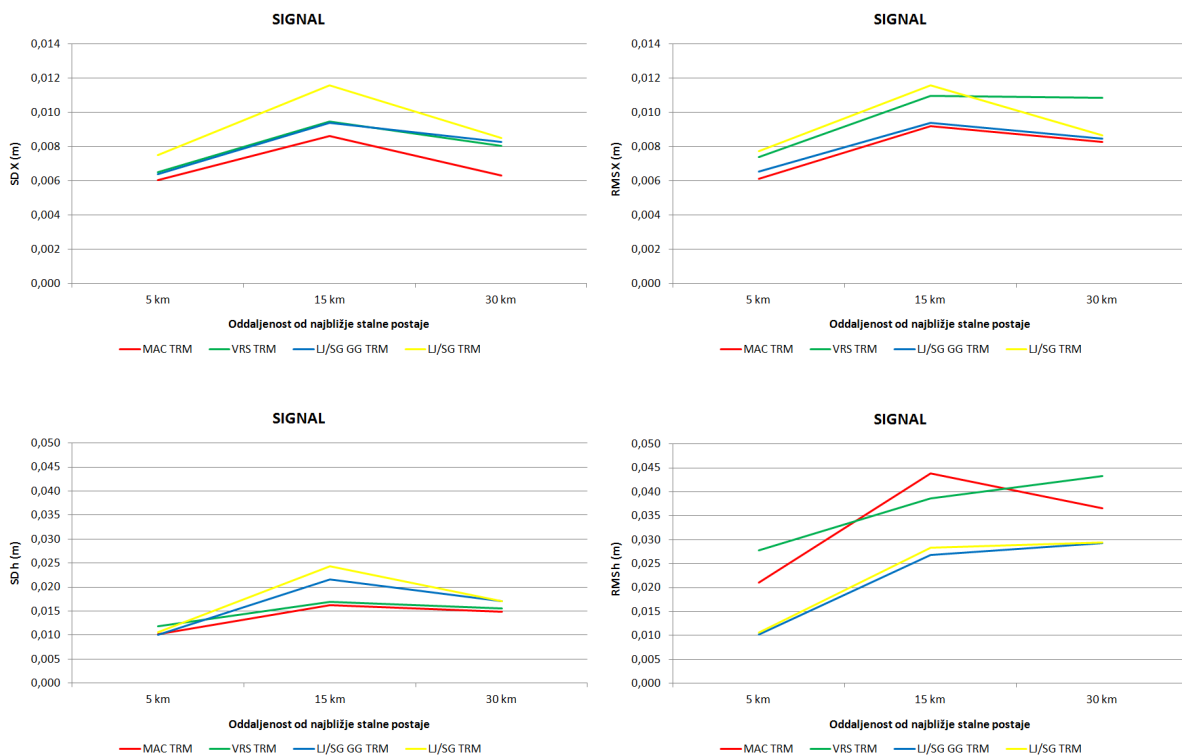
Figure 93: Ionospheric activity for September 17, 2011. Retrieved from SIGNAL web portal.

Posledica težjih merskih pogojev pa je spet lahko daljši čas za pridobitev fazno določene rešitve na premičnem sprejemniku v primeru MAC in posledično manjše število fazno določenih meritev. Dejstvo je sicer tudi, da se testna točka Šentvid nahaja zelo blizu ceste in da so tudi mimo vozeča vozila povzročala prekinitev signalov GNSS. Na ostalih dveh testnih točkah pa ni bilo možnih prekinitev signala zaradi ovir.

Iz grafov na sliki 94 je razvidna prisotnost sistematičnega pogreška višine v primeru obeh mrežnih proizvodov omrežja SIGNAL. Tudi izračunane srednje vrednosti višin od pravih odstopajo od 0.018 m do 0.041 m. Razlog je najverjetneje v napačnem upravljanju z antenami v omrežju, saj je v primeru mrežnih proizvodov v sporočilih RTK zapisan neznan tip antene. Po pregledu surovih podatkov LB2, iz katerih so bila dekodirana opazovanja referenčne postaje, je bilo ugotovljeno, da je v primeru mrežnih proizvodov zapisan tip referenčne antene »ADVNULLANTENNA NONE«, ki ni skladen z določili poimenovanja IGS.

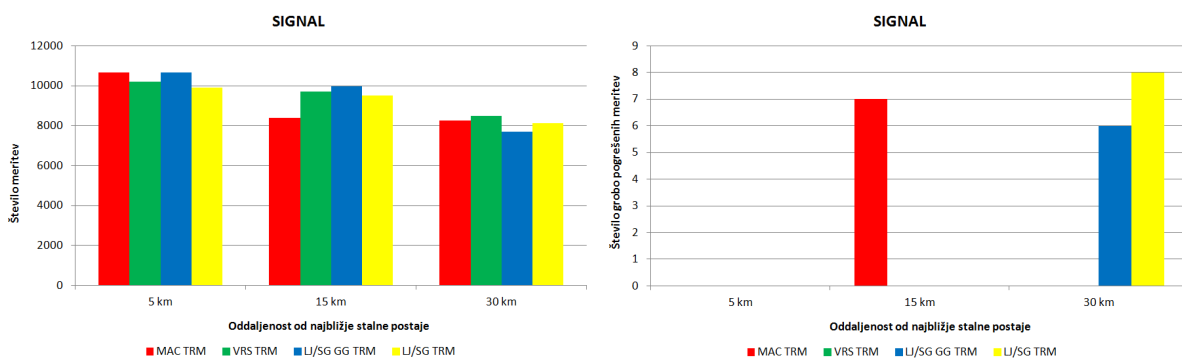
Po natančnosti se je v praktično vseh primerih najbolje izkazala uporaba mrežnega proizvoda MAC TRM.





Slika 94: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 94: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.



Slika 95: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrésenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 95: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.

Bolj objektivni pogled na delež fazno določenih meritev je določitev povprečnega časa za inicializacijo sprejemnika (ang. Time to Fix, TTF) pri posameznem proizvodu RTK. Za odstranitev vpliva komunikacije z omrežjem (izpadi povezave RTK), so bile v izračunu upoštevane samo diferencialno popravljene meritve (razred »MEAS«, podrazred »Code only«). Meritve ob izpadu komunikacije so razreda »NAV«, kar pomeni, da so koordinate določene avtonomno, brez popravkov RTK. Fazno določene meritve so razreda »MEAS«, podrazred »Fixed«.

Ker so bili sprejemniki GNSS nastavljeni tako, da so shranjevali meritve z 1-sekundnim intervalom, število vseh meritev neposredno predstavlja število sekund trajanja celotnega testa. Število avtonomnih meritev predstavlja tiste trenutke, ko ni bilo na voljo popravkov RTK. Poleg prekinitev komunikacije RTK, po katerih je bilo treba ponovno ročno vzpostaviti povezavo na sprejemniku, so sem vštet tudi vsi trenutku, ko omrežje ni pošiljalo popravkov.

Iz znanega intervala shranjevanja so bili izračunani povprečni časi med dvema inicializacijama kot kvocient vseh diferencialno popravljenih meritev in vseh fazno določenih meritev, kot to prikazujejo preglednice 26, 27 in 28 ter povzema slika 96.

Preglednica 25: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Table 25: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 5 km distance from nearest reference station.

| Število meritev \ Proizvod RTK        | MAC TRM | VRS TRM | LJ GG TRM | LJ TRM |
|---------------------------------------|---------|---------|-----------|--------|
| <b>Vse meritve</b>                    | 87948   | 86448   | 88025     | 88041  |
| <b>Razred »NAV«</b>                   | 107     | 2       | 415       | 2561   |
| <b>Razred »MEAS«, »Code only«</b>     | 77165   | 76238   | 76940     | 75594  |
| <b>Razred »MEAS«, »Fixed«</b>         | 10676   | 10208   | 10670     | 9886   |
| <b>Čas med dvema inicializacijama</b> | 7.2 s   | 7.5 s   | 7.2 s     | 7.6 s  |

Preglednica 26: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

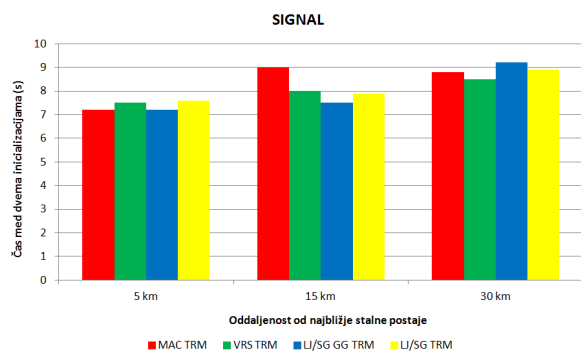
Table 26: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 15 km distance from nearest reference station.

| Število meritev \ Proizvod RTK        | MAC TRM | VRS TRM | LJ GG TRM | LJ TRM |
|---------------------------------------|---------|---------|-----------|--------|
| <b>Vse meritve</b>                    | 86688   | 86754   | 86771     | 86817  |
| <b>Razred »NAV«</b>                   | 2473    | 0       | 2529      | 2219   |
| <b>Razred »MEAS«, »Code only«</b>     | 75831   | 77064   | 74277     | 75102  |
| <b>Razred »MEAS«, »Fixed«</b>         | 8384    | 9690    | 9965      | 9498   |
| <b>Čas med dvema inicializacijama</b> | 9.0 s   | 8.0 s   | 7.5 s     | 7.9 s  |

Preglednica 27: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Table 27: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network at 30 km distance from nearest reference station.

| Število meritev                | Proizvod RTK | MAC TRM | VRS TRM | SG GG TRM | SG TRM |
|--------------------------------|--------------|---------|---------|-----------|--------|
| Vse meritve                    |              | 86967   | 86974   | 86796     | 86852  |
| Razred »NAV«                   |              | 6544    | 6615    | 7979      | 6635   |
| Razred »MEAS«, »Code only«     |              | 72186   | 71865   | 71113     | 72098  |
| Razred »MEAS«, »Fixed«         |              | 8237    | 8493    | 7703      | 8119   |
| Čas med dvema inicializacijama |              | 8.8 s   | 8.5 s   | 9.2 s     | 8.9 s  |



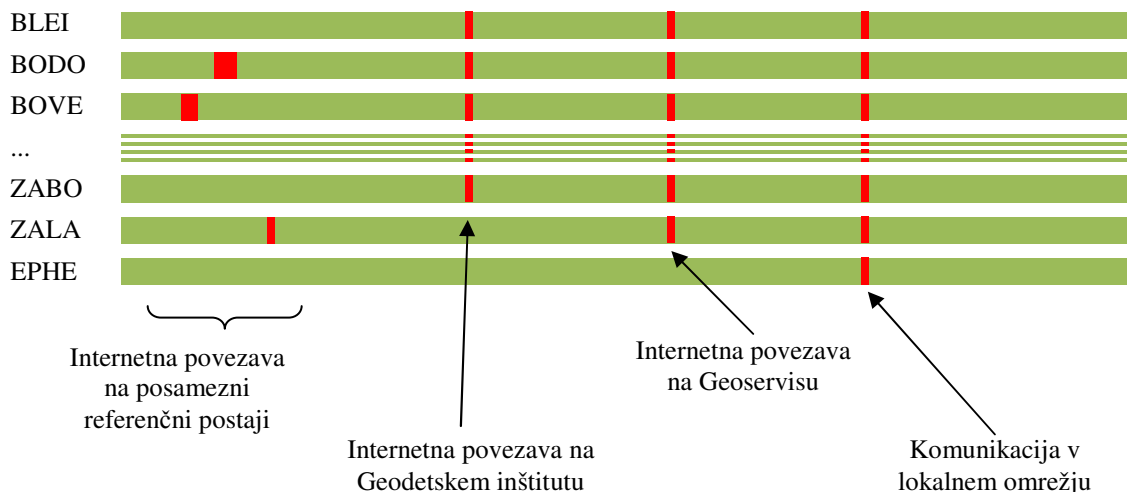
Slika 96: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 96: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network with respect to the distance from nearest reference station.

Pri dolžinah baznega vektorja 5 km in 15 km se lepo vidi prednost uporabe opazovanj GPS in GLONASS, saj se je sprejemnik, ki je uporabljal proizvod LJ GG TRM v obeh primerih najhitreje inicializiral. Pri tem pa vsaj pri dolžini baznega vektorja 5 km ni zaostajal po natančnosti za sprejemniki, ki so uporabljali mrežne proizvode.

Pri testu na oddaljenosti 30 km od najbližje referenčne postaje so razlogi približno 1 uro in 50 minutne prekinitve na vseh sprejemnikih v mobilnem dostopu do Mobitelove storitve DGPS. Sprejemniki so javljali, da je internetna povezava prekinjena (»GS Internet 1 disconnected«) in da ne morejo dostopati do storitev RTK (»☒ Connected to RTK Service«). Komunikacijska povezava med Geodetskim inštitutom in centrom lastnega omrežja na Geoservisju je zadovoljivo delovala, tako da je bil vpliv Geodetskega inštituta izključen. Pregled zapisniških datotek »GNSS Spider Site Status History« pa je pokazal na še en možen vzrok. Tako na referenčni postaji GSR1 kot na SLOG so se v času med 12:26 in 13:24 pojavljale prekinitve sledenja satelitov, kar kaže na potencialne težave v komunikaciji med referenčnimi postajami in Geodetskim inštitutom. Prav različni načini dostopa do posameznih referenčnih postaj so omogočali preprosto lociranje komunikacijskih težav, kakor prikazuje slika 97.





Slika 97: Iz narave prekinitev v tokovih podatkov z referenčnih postaj se lahko sklepa na potencialne vzroke.  
Figure 97: Nature of communication interruptions in reference station data streams can expose potential causes.

Za primer je prikazana zapisniška datoteka stanja postaje Slovenj Gradec:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<GNSSpiderSiteStatusHistory FormatVersion="1.0" Generator="Spider v4.1.0.3784">
  <Site>SLOG</Site>
  <Date>2011-09-21</Date>
  <ElevationMask>10.0</ElevationMask>
  <SatelliteSystems>
    <System Name="GPS">
      <DataSeries Name="visible">
        <DataPoint XValue="11:00:00.0" YValue="8" />
        <DataPoint XValue="11:00:50.0" YValue="7" />
        <DataPoint XValue="11:15:50.0" YValue="8" />
        <DataPoint XValue="11:59:55.0" YValue="8" />
      </DataSeries>
      <DataSeries Name="tracked">
        <DataPoint XValue="11:00:00.0" YValue="0" />
        <DataPoint XValue="11:24:20.0" YValue="8" />
        <DataPoint XValue="11:59:55.0" YValue="8" />
      </DataSeries>
      <DataSeries Name="fixed">
        <DataPoint XValue="11:00:00.0" YValue="0" />
        <DataPoint XValue="11:29:05.0" YValue="8" />
        <DataPoint XValue="11:59:55.0" YValue="8" />
      </DataSeries>
    </System>
  </SatelliteSystems>
</GNSSpiderSiteStatusHistory>
```

### 5.1.2 Primerjava mrežnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja

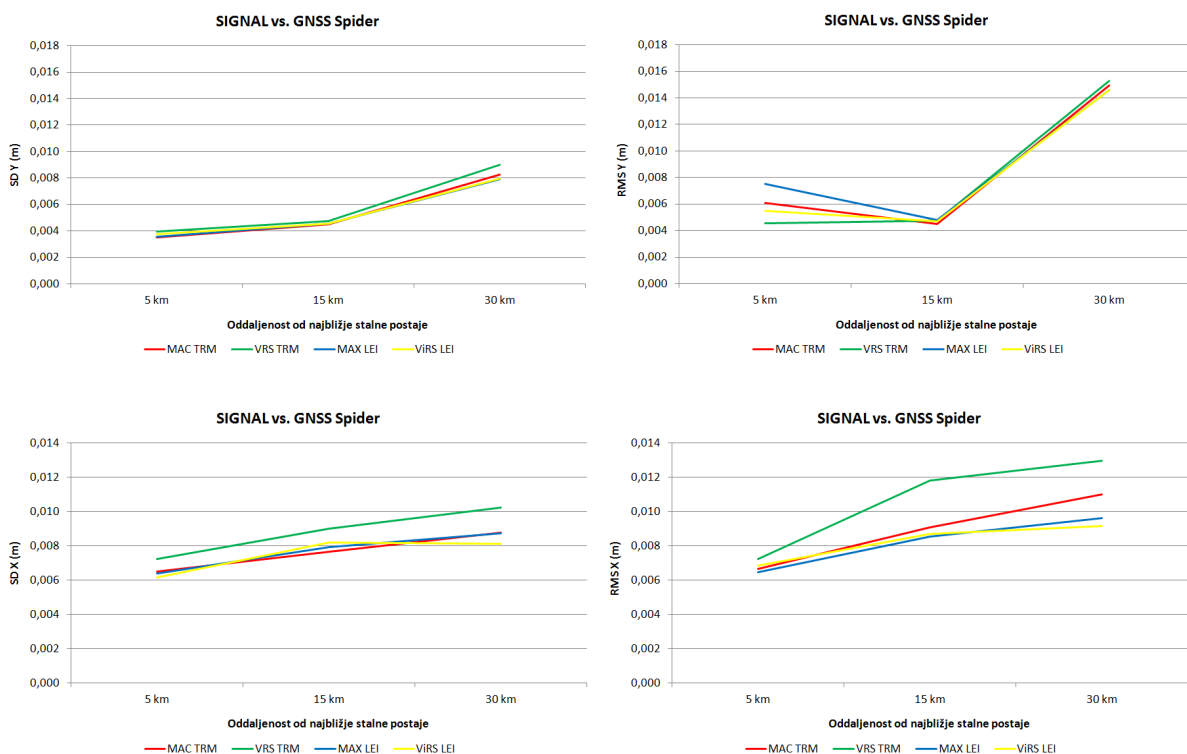
V tem testu so se primerjali mrežni proizvodi RTK omrežij SIGNAL in lastnega omrežja, in sicer s predstavitvijo popravkov po konceptih MAC in VRS. V vseh primerih so bila uporabljena samo opazovanja GPS.

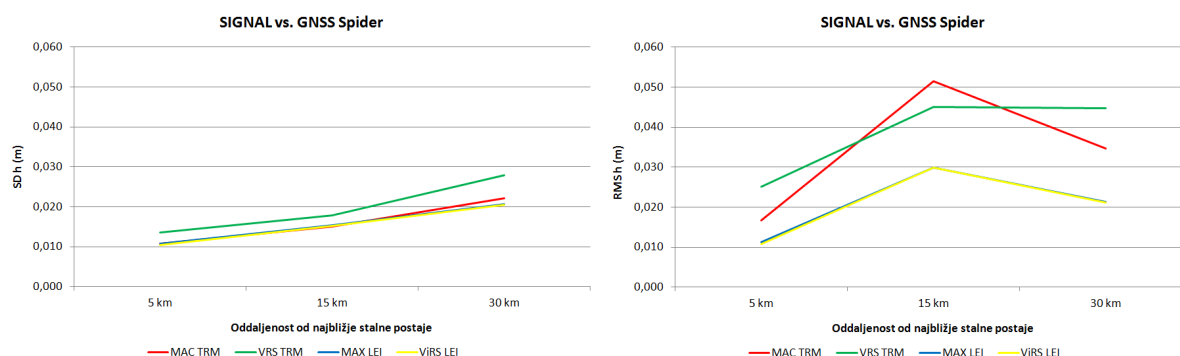
Pričakovani so bili usklajeni rezultati, saj gre v vseh primerih za mrežne proizvode RTK. Poleg tega je koncept MAC standardiziran, zato se lahko za ugotovljene razlike v rezultatih sklepa, da imajo vzrok samo v zmogljivosti mrežnega algoritma posameznega proizvajalca, predvsem v smislu hitre in zanesljive fazne določitve celotnega omrežja, določitve vplivov na opazovanja na vseh referenčnih postajah in izbire optimalne celice za pripravo popravkov RTK.

Po natančnosti v negativnem smislu izstopa proizvod VRS TRM omrežja SIGNAL, pri vseh ostalih proizvodih pa so natančnosti skoraj enake. Tudi pri tem testu je očitno prisoten sistematičen pogrešek višine v primeru storitev omrežja SIGNAL.

Po številu fazno določenih meritev so vsi štirje proizvodi primerljivi. Vendar je v povprečju število meritev v primerih uporabe proizvodov VRS TRM/ViRS LEI večje od števila meritev v primerih MAC TRM/MAX LEI za 2% do 7%, kar je bilo pričakovano. Razlog je v zahtevnejši obdelavi opazovanj, saj v primeru proizvodov MAC TRM/MAX LEI premični sprejemnik sam modelira vplive na opazovanja, v primeru VRS TRM/ViRS LEI pa se interpolacija opravi na osrednjem strežniku.

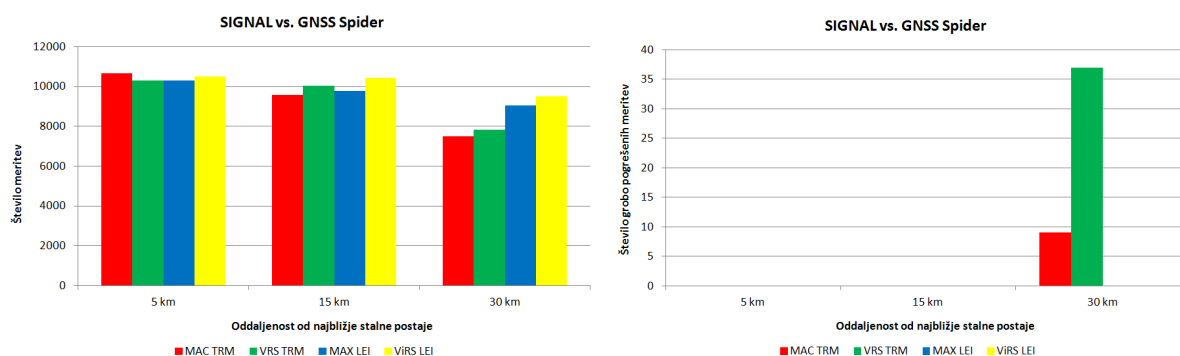
V primeru 30 km baznega vektorja izstopa kar za približno 21% manjše število fazno določenih meritev v primeru uporabe proizvodov omrežja SIGNAL glede na lastno omrežje ter visoko število grobo pogrešenih meritev – 9 v primeru proizvoda MAC TRM in 37 v primeru VRS TRM. Pri tem testu je bilo opazno večje število izpadov komunikacije, pri čemer je bilo treba na sprejemnikih ponovno vzpostaviti povezavo RTK, posledica pa je manjše število fazno določenih položajev. Največkrat je do izpada prišlo ravno v primeru omrežja SIGNAL. Vzrok temu bi lahko bila tudi kompleksna komunikacijska pot od centra Službe za GPS do mobilnega operaterja Mobitel, ki trži storitve RTK, in nadalje do premičnega sprejemnika. Vzrok za del izpada fazno določenih meritev pa je tudi počasna inicializacija v posameznih obdobjih. Med 13. in 14. uro je opazen občutno daljši čas za inicializacijo premičnih sprejemnikov, ki sta uporabljala mrežne proizvode omrežja SIGNAL. V tem času je tudi prišlo do večine grobo pogrešenih meritev. Potencialni vzroki so manjše število razpoložljivih satelitov, visoke vrednosti GDOP ter srednja stopnja ionosferske aktivnosti. Možen vzrok gre lahko iskati tudi v sub-optimalnih nastavitvah omrežja SIGNAL, kjer je v modulu RTCM3Net uporabljen višinski kot  $0^\circ$ , kar pomeni, da se uporabijo opazovanja z višinskim kotom  $5^\circ$ , kolikor znaša nastavev višinskega kota za posamezne referenčne postaje, to pa lahko otežuje skupno fazno določitev celotnega omrežja. V primeru lastnega omrežja je za mrežno analizo nastavljen višinski kot  $10^\circ$ , kar je hkrati privzeta in priporočena vrednost s strani proizvajalca Leica Geosystems.





Slika 98: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 98: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.



Slika 99: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 99: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.

Preglednica 28: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 5 km.

Table 28: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 5 km distance from nearest reference station.

Proizvod RTK	MAC TRM	VRS TRM	MAX LEI	ViRS LEI
Število meritev				
Vse meritve	86967	86993	86993	86989
Razred »NAV«	0	0	49	696
Razred »MEAS«, »Code only«	76310	76692	76486	75791
Razred »MEAS«, »Fixed«	10657	10301	10458	10502
Čas med dvema inicializacijama	7.2 s	7.4 s	7.3 s	7.2 s

Preglednica 29: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km.

Table 29: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 15 km distance from nearest reference station.

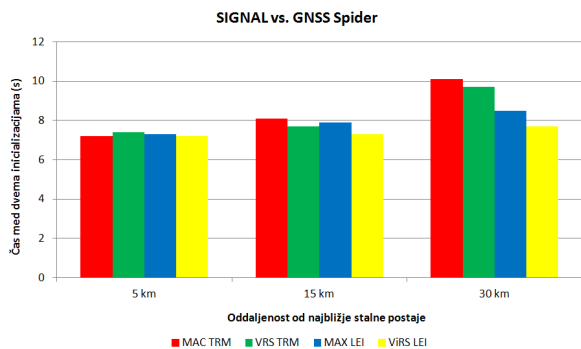
Število meritev \ Proizvod RTK	MAC TRM	VRS TRM	MAX LEI	ViRS LEI
Vse meritve	86857	86870	86879	86900
Razred »NAV«	158	0	46	741
Razred »MEAS«, »Code only«	77137	76831	77065	75730
Razred »MEAS«, »Fixed«	9562	10039	9768	10429
Čas med dvema inicializacijama	8.1 s	7.7 s	7.9 s	7.3 s

Preglednica 30: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Table 30: Average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network at 30 km distance from nearest reference station.

Število meritev \ Proizvod RTK	MAC TRM	VRS TRM	MAX LEI	ViRS LEI
Vse meritve	88760	88745	88729	88683
Razred »NAV«	5163	5408	2865	6209
Razred »MEAS«, »Code only«	76098	75524	76819	72976
Razred »MEAS«, »Fixed«	7499	7813	9045	9498
Čas med dvema inicializacijama	10.1 s	9.7 s	8.5 s	7.7 s

V vseh primerih razen enem, kjer si je delil prvo mesto, se je najhitreje inicializiral sprejemnik, ki je uporabljal proizvod ViRS LEI iz lastnega omrežja GNSS. Razen v primeru proizvoda MAC TRM pri 5 km baznem vektorju so povprečni časi za inicializacijo pri uporabi mrežnih proizvodov lastnega omrežja vedno krajši kot pri uporabi proizvodov RTK omrežja SIGNAL. Pri tem pa so bile natančnosti koordinat v primeru uporabe proizvodov lastnega omrežja enake ali višje kot pri uporabi proizvodov omrežja SIGNAL. Ob uporabi proizvodov RTK lastnega omrežja ni bilo grobo pogrešenih meritev, ob uporabi proizvodov RTK omrežja signal pa je prišlo do grobo pogrešenih meritev pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

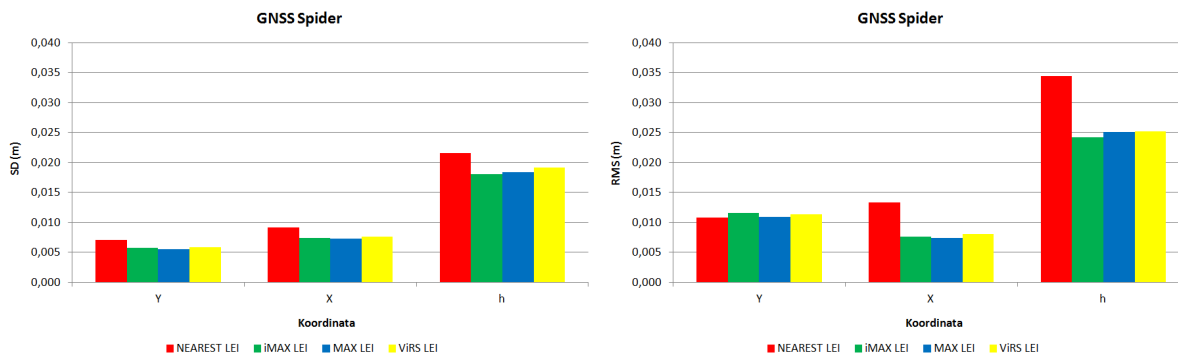


Slika 100: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK omrežja SIGNAL in lastnega omrežja glede na oddaljenost od najbližje referenčne postaje.

Figure 100: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of SIGNAL network and own network with respect to the distance from nearest reference station.

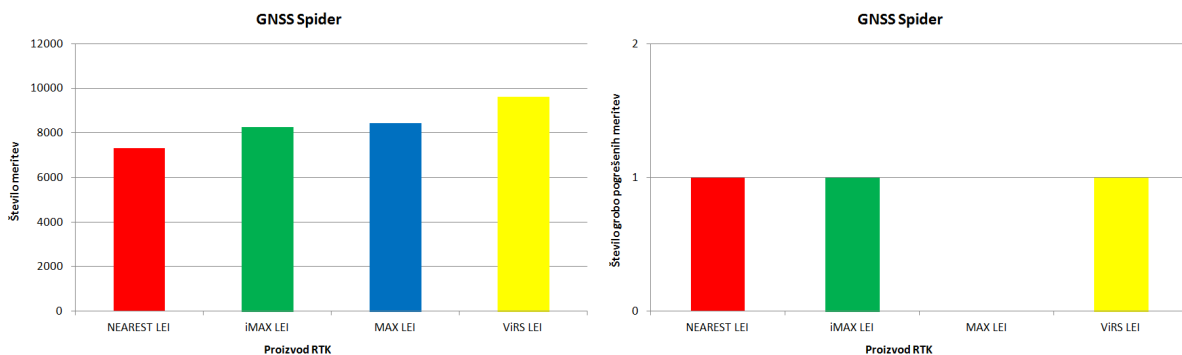
### 5.1.3 Primerjava proizvodov lastnega omrežja

Test štirih različnih proizvodov RTK lastnega omrežja GNSS je pokazal prednosti mrežnih proizvodov, saj so v vseh testih kakovosti določitve položaja z njimi višje, povprečni časi med dvema inicializacijama pa za najmanj 15% krajši kot v primeru navezave na najbližjo referenčno postajo. Natančnosti določitve položaja pri različnih mrežnih proizvodih so skoraj enake. Največje število fazno določenih meritev in najkrajši povprečni čas med dvema inicializacijama je dosegel sprejemnik, ki je uporabljal proizvod ViRS LEI.



Slika 101: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 101: Comparison of standard deviations and RMS values from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.



Slika 102: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

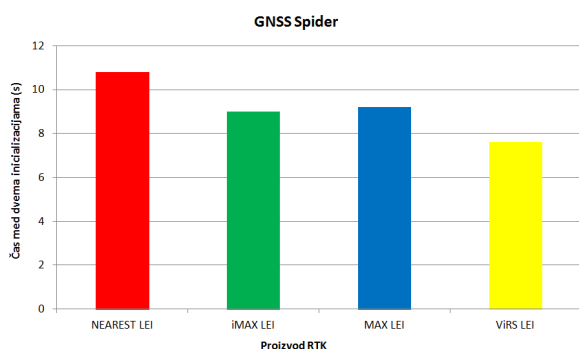
Figure 102: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.

Tudi za test proizvodov RTK lastnega omrežja je bilo podrobneje analizirano število meritev in izračunan povprečen čas za inicializacijo. Rezultate prikazujeta preglednica 31 in slika 103.

Preglednica 31: Ocena povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Table 31: Average time-to-fix from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.

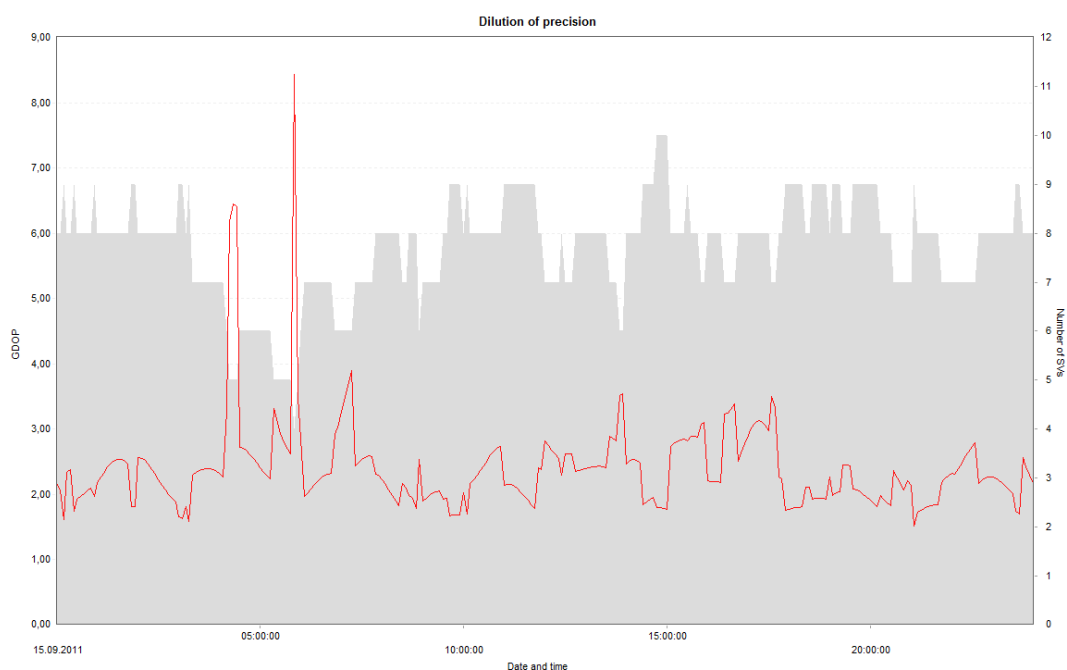
Proizvod RTK	NEAREST LEI	i-MAX LEI	MAX LEI	ViRS LEI
Število meritev				
Vse meritve	86344	86342	86376	86349
Razred »NAV«	13	3448	60	3712
Razred »MEAS«, »Code only«	79019	74628	77887	73027
Razred »MEAS«, »Fixed«	7312	8266	8429	9609
Čas med dvema inicializacijama	10.8 s	9.0 s	9.2 s	7.6 s



Slika 103: Primerjava povprečnih časov za inicializacijo pri uporabi različnih proizvodov RTK lastnega omrežja in oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 30 km.

Figure 103: Comparison of average time-to-fix from different RTK products of own network at 30 km distance from nearest reference station.

Pri tem testu ni niti enkrat prišlo do prekinitve komunikacije. Vsi sprejemniki so bili s strežnikom NTRIP lastnega omrežja neprekinjeno povezani 24 ur. To omogoča še en pogled na zmogljivosti omrežja GNSS pri različnih proizvodih. V primeru individualiziranih mrežnih popravkov VRS in i-MAX omrežje GNSS ne pošilja popravkov premičnim sprejemnikom, če ni fazno določeno. V primeru uporabe popravkov najbližje referenčne postaje sprejemnik še vedno sprejema popravke le-te, v primeru mrežnih popravkov MAC pa sprejema popravke glavne postaje, ne glede na to, ali je omrežje fazno določeno ali ne. Ta situacija je prav tako razvidna iz preglednice 31, kjer je v primerih uporabe proizvodov i-MAX LEI in ViRS LEI opazno večji delež avtonomnih meritev. Večina avtonomnih meritev se je pojavila v času od 04:04 do 04:16 ter od 05:03 do 05:47. Iz slike 104 je razvidno, da je prav v tem času na voljo najmanjše število satelitov, prisotna pa sta bila dva maksimuma GDOP. Zato so bila v okoliških referenčnih postajah občasno fazno določena opazovanja samo za 4 satelite, takrat pa omrežje ne more določiti mrežnih popravkov.



Slika 104: Razpoložljivost satelitov in vrednost GDOP za 15.09.2011.

Figure 104: Satellite availability and GDOP values for September 15, 2011.

Sprejemnika, ki sta uporabljala proizvode MAX LEI in NEAREST LEI, sta v tem času še vedno omogočala kakovostno določitev koordinat z navezavo na najbližjo oziroma glavno referenčno postajo (v obeh primerih je bila to SLOG) tudi pri samo 5 satelitih in kljub dolžini baznega vektorja skoraj 30 km. Sprejemnik, ki je uporabljal proizvod MAX LEI, je v času, ko omrežje ni moglo določiti mrežnih popravkov (skupno 56 minut), opravil 287 fazno določenih meritev, kar pomeni, da je povprečni čas med dvema inicializacijama znašal 11.7 s. To pa pomembno prispeva tudi k dvigu produktivnosti uporabnikov omrežja GNSS. Dodatno velja izpostaviti, da le v primeru uporabe proizvoda MAX LEI ni bilo grobo pogrešenih meritev. V vseh ostalih primerih je bilo grobo pogrešeno po eno opazovanje.

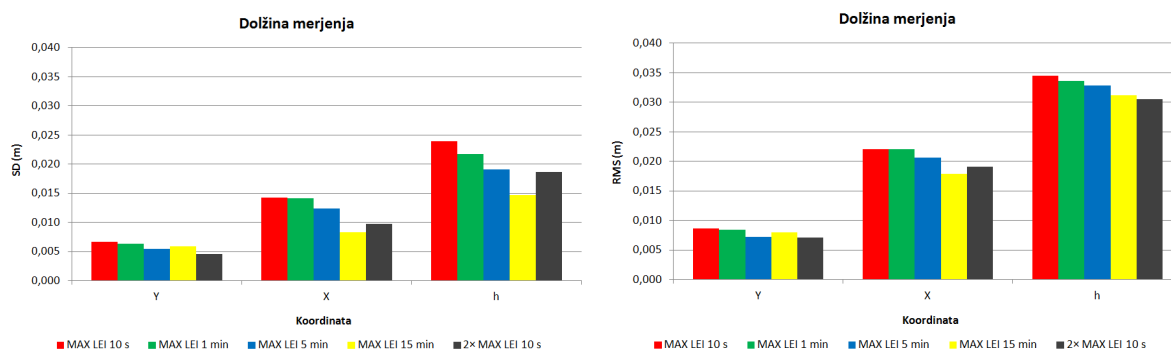
V testu pa je presenetila opazno hitrejša inicializacija v primeru ViRS LEI glede na i-MAX. V obeh primerih gre za individualizirane popravke, le da je v primeru ViRS dolžina baznega vektorja zelo kratka, v primeru i-MAX pa sprejemnik izračuna bazni vektor do fizične referenčne postaje. Vzrok temu je lahko le algoritem v premičnem sprejemniku. Avtor niti z osebno korespondenco z razvijalci programske opreme Leica GNSS Spider ni uspel opredeliti vzroka za takšno obnašanje premičnega

sprejemnika. Verjetno pri uporabi proizvoda i-MAX premični sprejemnik porabi dlje časa za modeliranje preostalih vplivov na opazovanja, ki jih pričakuje glede na dolžino baznega vektorja.

#### 5.1.4 Primerjava vpliva dolžine trajanja meritve na kakovost določitve položaja

Čas trajanja meritve na posamezni točki vpliva na kakovost določitve položaja. Ta vpliv je bolj opazen pri tistih koordinatah, kjer je konstelacija GPS najšibkejša, to je v smeri proti severu (koordinata  $X$ ) in po višini ( $h$ ). Po koordinati  $Y$  je izboljšanje natančnosti tudi po 15 minutah izmere po metodi RTK marginalno, predvsem glede na vloženi čas. Tako je po 1 minuti opazovanj izboljšanje natančnosti po koordinatah  $Y$ ,  $X$  vsega nekaj odstotkov, po koordinati  $h$  pa 9%, po 5 minutah 17%, 13% in 20% ter po 15 minutah merjenja na točki 11%, 42% in 39% izboljšanje po koordinatah  $Y$ ,  $X$  in  $h$  glede na 10 s meritev.

Skladno z navodili za izmero RTK GNSS naj bi meritve na določenih točkah ponovili. Čas med dvema meritvama iste točke naj bi bil vsaj 30 minut, da se meritvi lahko smatra za neodvisni (Mozetič in sod., 2006). Zato so bili rezultati meritev preračunani še v tem smislu. Namen testa je bil ugotoviti, kako na kakovost določitve položaja vpliva povprečenje dveh 10-sekundnih meritev, med katerima je preteklo vsaj 30 minut. Ker so se meritve izvajale približno vsakih 15 minut, je bila za izračun sredine vzeta vsaka druga meritev, to pomeni povprečje 1. in 3., 2. in 4., 3. in 5. in tako dalje. Tako je bilo določenih 50 novih, z dvojno izmero določenih in povprečenih koordinat (aritmetična sredina), ki so bile vključene v primerjavo (slika 105).



Slika 105: Primerjava natančnosti in točnosti pridobljenih koordinat glede na dolžino trajanja meritve.

Figure 105: Comparison of standard deviations and RMS values from different lengths of measurement interval.

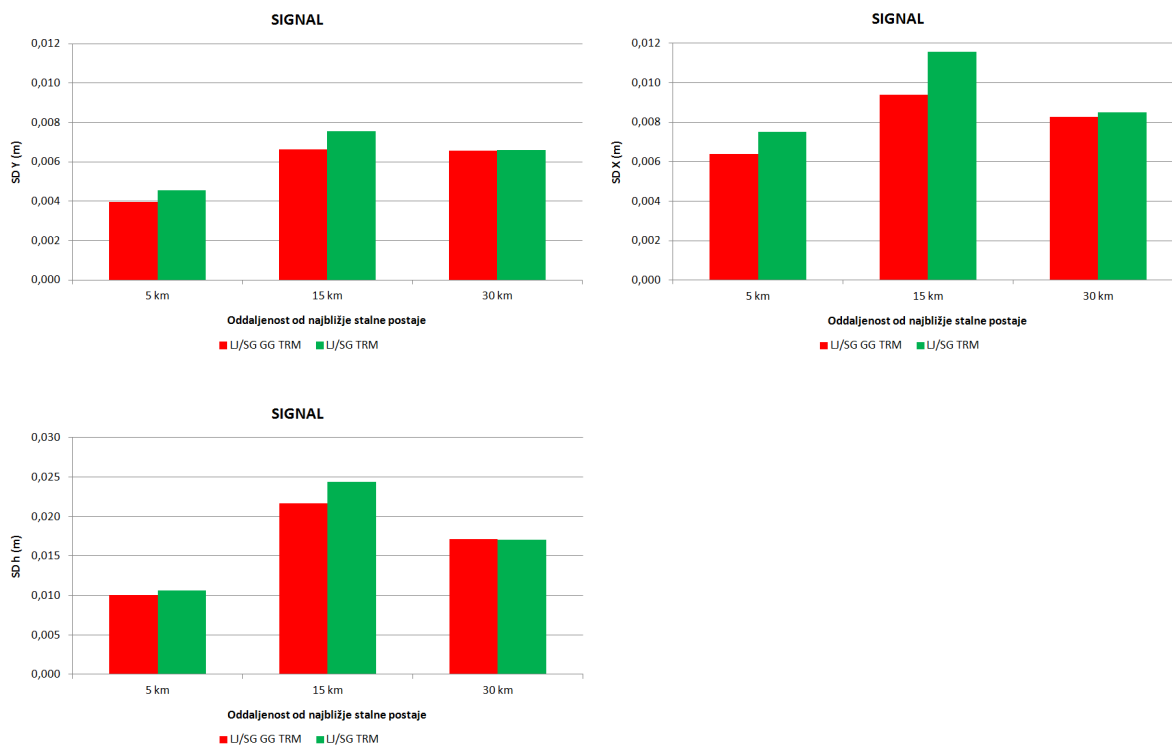
Povprečje dveh meritev, med katerima je poteklo vsaj 30 minut, po natančnosti presega 5-minutno neprekinjeno merjenje na točki, po koordinati  $Y$  pa celo presega 15-minutno merjenje. Po točnosti pa so primerljive s 15-minutno meritvijo na točki. Pri tem odstopanje med dvema meritvama ni nikoli presevalo dopustne vrednosti 5 cm.

#### 5.1.5 Prednosti uporabe satelitov GLONASS

Prednost uporabe dodatnih opazovanj sistema GLONASS se je dokazala praktično v vseh testih. Natančnost določitve koordinat je bila z uporabo skupnih opazovanja GPS in GLONASS vedno višja ali vsaj enaka kot z uporabo samo opazovanj GPS. Izboljšanje natančnosti je najbolj opazno v smeri koordinate  $X$ . Pri 5 km in 15 km dolžini baznega vektorja se je sprejemnik, ki je uporabljal proizvod LJ GG TRM tudi hitreje inicializiral. Zanimivo pa je, da pri 30 km baznem vektorju dodatna opazovanja niso opazno prispevala k natančnosti, na hitrost inicializacije pa so delovala celo kvarno,

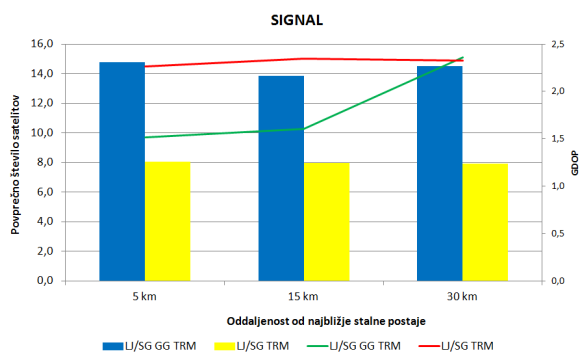


saj je sprejemnik, ki je uporabljal proizvod SG GG TRM v povprečju potreboval za inicializacijo 9.2 s, sprejemnik, ki je uporabljal proizvod SG TRM pa 8.9 s. Vendar pa je bilo pri tem 8 meritev grobo pogrešenih, z uporabo vseh opazovanj GPS in GLONASS pa 6. Primerjava rezultatov za primer uporabe najbližje referenčne postaje z- in brez opazovanj GLONASS je prikazana na slikah 106, 107 in 108.



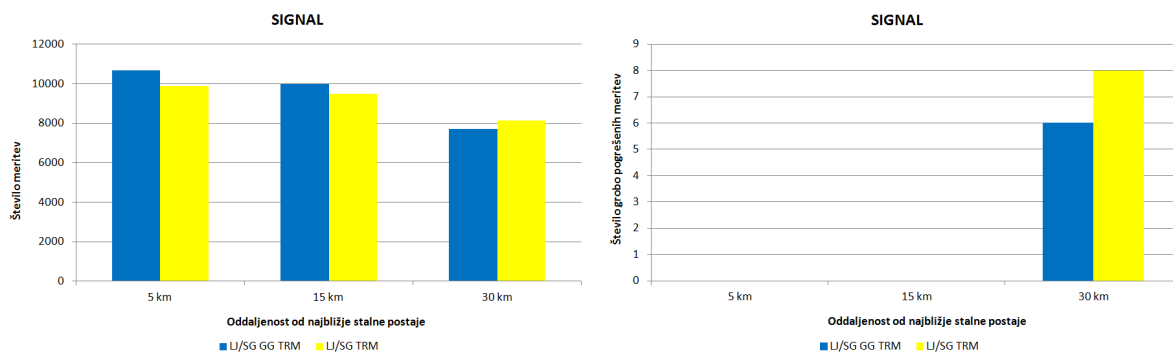
Slika 106: Primerjava natančnosti dobljenih koordinat z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.

Figure 106: Comparison of standard deviations from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.



Slika 107: Primerjava povprečnega števila satelitov (stolpni graf) in vrednosti GDOP (linijski graf) z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.

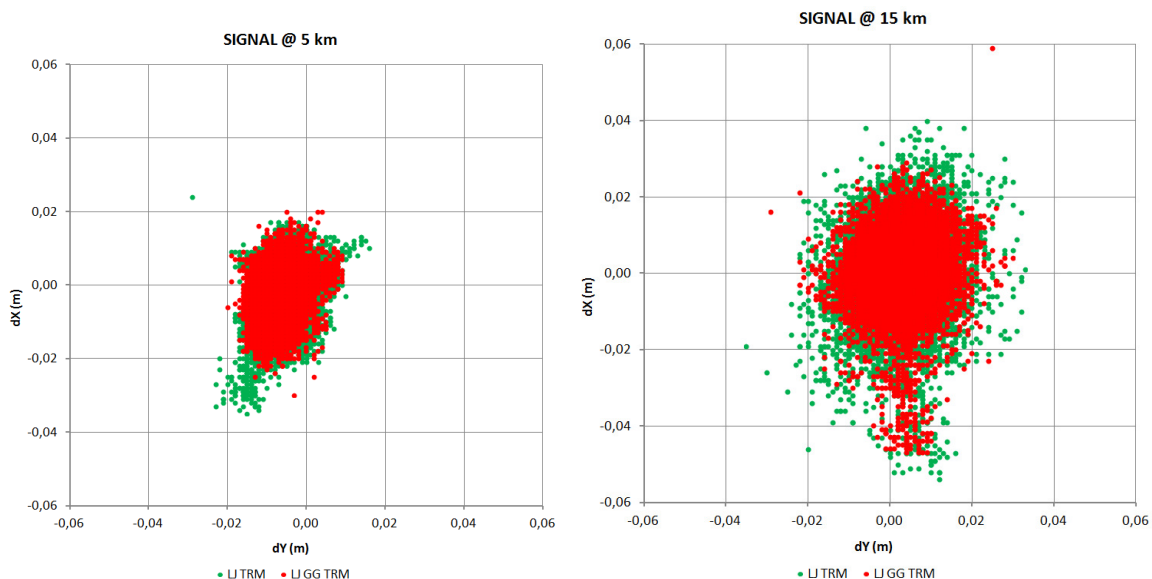
Figure 107: Comparison of average number of used satellites (bar graph) and GDOP values (line graph) from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.

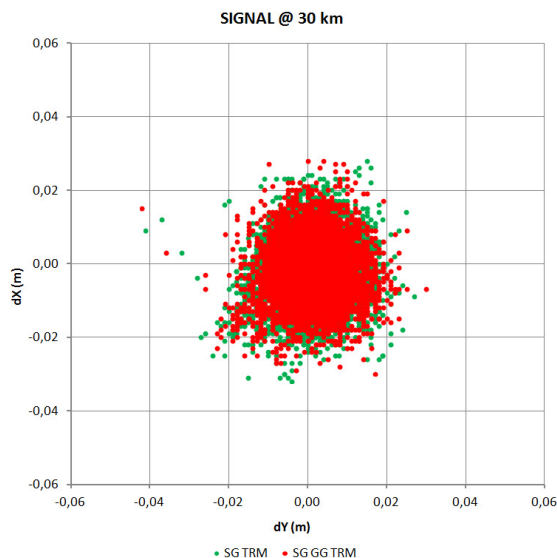


Slika 108: Primerjava števila vseh fazno določenih meritev in števila grobo pogrešenih meritev z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.

Figure 108: Comparison of number of all fixed solutions and number of outliers from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.

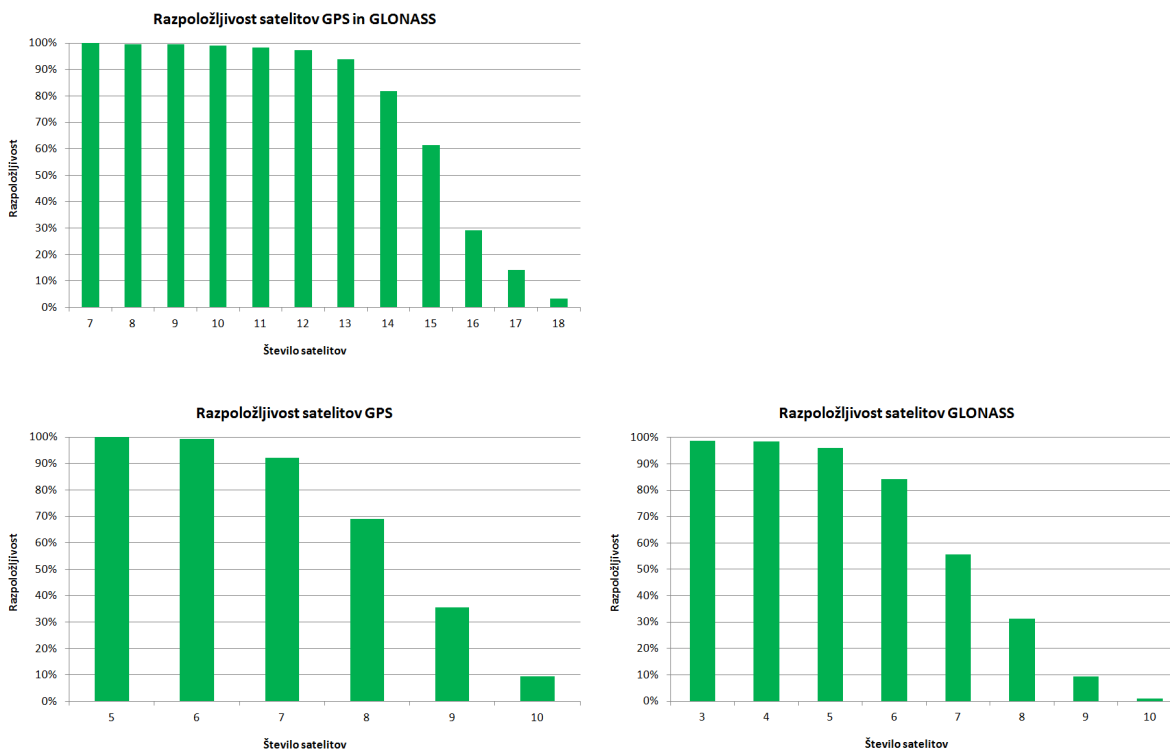
Sateliti GPS imajo tirnice nagnjene za  $55^\circ$  glede na ekvator, kar pomeni, da znotraj  $35^\circ$  okoli Zemljinih polov ne sežejo. To pomeni, da sprejemnik na polu ne more slediti satelitov z višinskim kotom nad  $55^\circ$ . Zato je koordinata  $X$  na naši zemljepisni širini slabše določena kot  $Y$ . Ker imajo sateliti GLONASS tirnice nagnjene za  $64,8^\circ$ , je bilo pričakovano izboljšanje natančnosti koordinate  $X$  izmerjenih točk. Situacijo prikazujejo grafi na sliki 109, kjer je raztros meritev v primeru uporabe samo opazovanj GPS bolj razpotegnjen v smeri sever-jug.





Slika 109: Primerjava položajev z- in brez uporabe opazovanj GLONASS glede na dolžino baznega vektorja.  
*Figure 109: Position scatter from GPS-only and combined GPS+GLONASS measurements with respect to the distance from nearest reference station.*

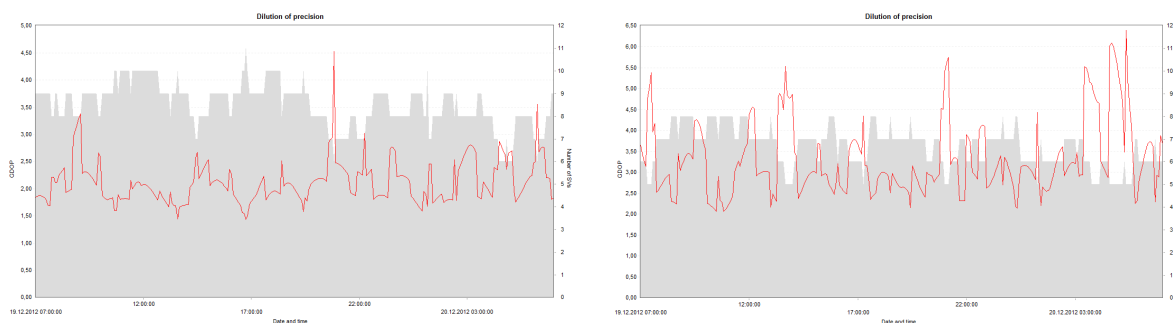
Večja prednost uporabe vseh razpoložljivih satelitov GPS in GLONASS bi bila verjetno bolj izražena v okoljih z več ovirami, kjer število satelitov samo sistema GPS ne bi zagotavljalo pridobitve kakovostnega položaja, ali pa določitve položaja sploh ne bi bila mogoča. To je razvidno že iz meritev na testni točki Šentvid, kjer je bilo prisotnih največ ovir (mimovozeči traktorji in tovornjaki zaradi bližine ceste), faktor izboljšave natančnosti pa je bil tam največji.



Slika 110: Kumulativna razpoložljivost satelitov GPS, GLONASS ter GPS in GLONASS skupaj.  
*Figure 110: Cumulative sum of available satellites for GPS-only, GLONASS-only and combined GPS+GLONASS.*

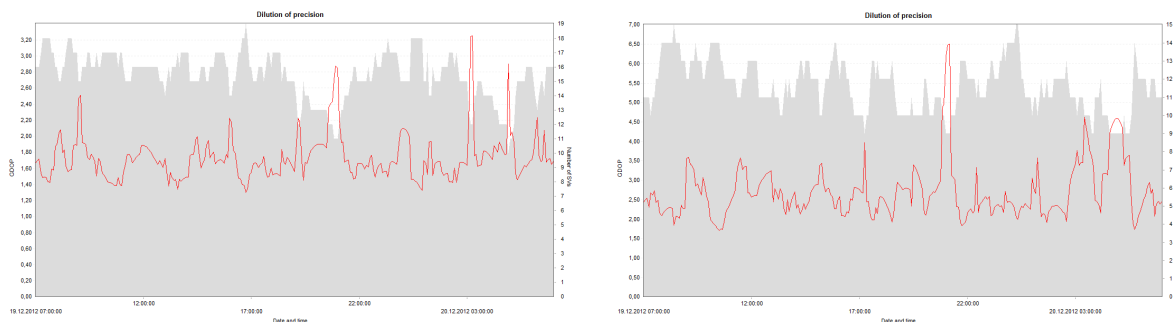
Za primer je bila opravljena simulacija delovišča v ozki dolini, ki se razprostira v smeri vzhod-zahod in pri kateri znaša višinski kot v smeri proti severu in jugu  $35^\circ$ . S programskim paketom Leica Geo Office so bili pripravljene grafi s prikazom števila vidnih satelitov in faktorja GDOP. Uporabljeni so bili naslednji podatki:

- Lokacija: Ljubljana
- Višinski kot:  $10^\circ$
- Almanah iz dne 13.12.2012
- Interval od 19.12.2012, 7:00 do 20.12.2012, 7:00



Slika 111: Razpoložljivost satelitov GPS na odprtem terenu (levo) in v ozki dolini, ki se razprostira v smeri vzhod-zahod (desno).

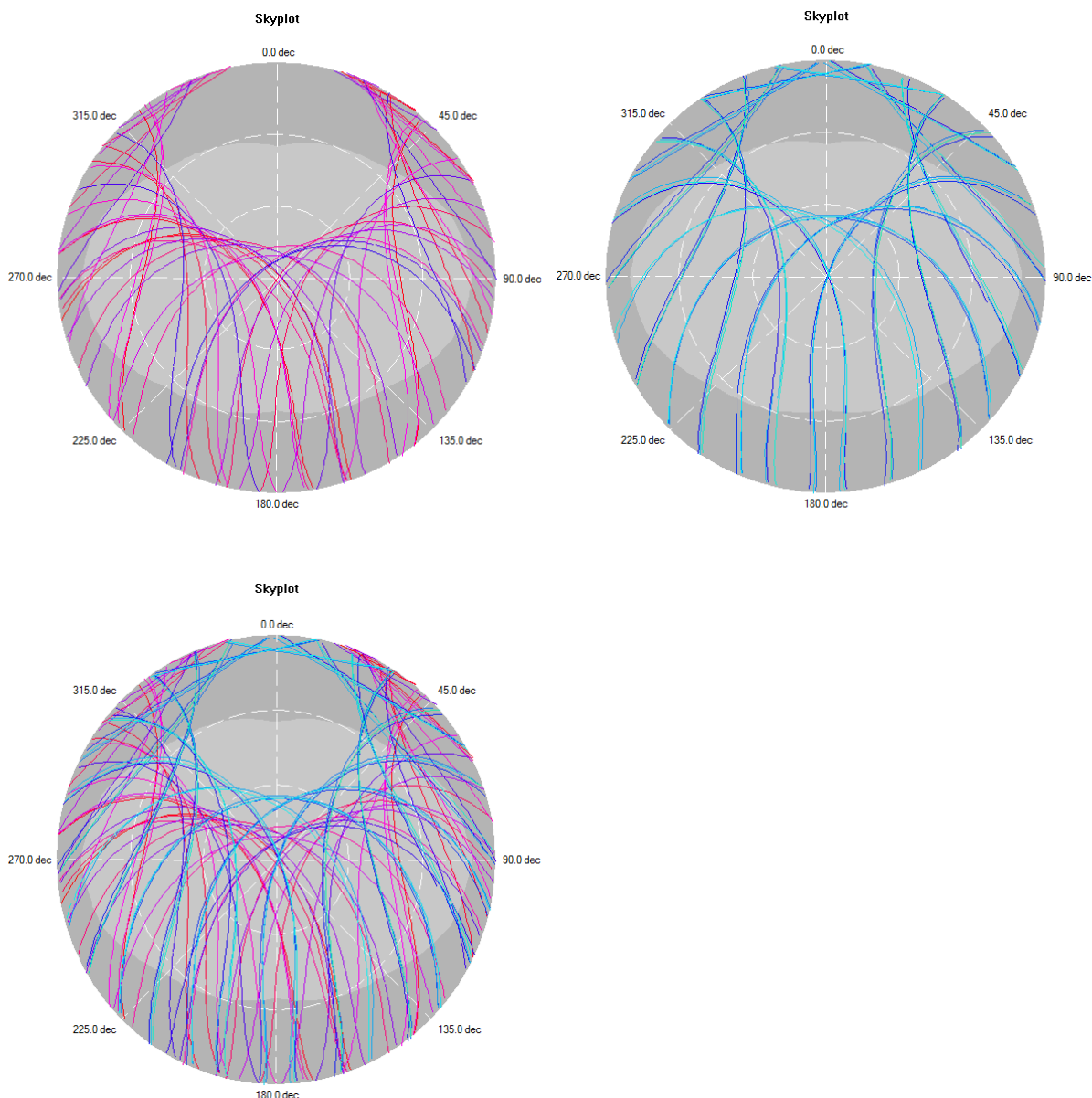
*Figure 111: GPS satellite availability in open sky (left) and narrow valley which extends in east-west (right).*



Slika 112: Razpoložljivost satelitov GPS in GLONASS na odprtem terenu (levo) in v ozki dolini, ki se razprostira v smeri vzhod-zahod (desno).

*Figure 112: Combined GPS+GLONASS satellite availability in open sky (left) and narrow valley which extends in east-west (right).*

Iz slik 111 in 112 je razvidno, da je v danih razmerah število satelitov GPS 8-krat padlo na vrednost 5, kar je najmanjše število satelitov, ki jih mora slediti sprejemnik, da je mogoče izvajati izmero RTK, vrednost GDOP pa 6-krat preseгла vrednost 5. V primeru uporabe signalov obeh sistemov je najmanjše število vidnih satelitov 9, GDOP pa le enkrat preseže vrednost 5.



Slika 113: Prikaz tirnic satelitov GPS (vijolična), GLONASS (modra) ter GPS in GLONASS skupaj. Na slikah je v temno sivi barvi vrisana tudi ovira.

Figure 113: Sky plot for GPS-only (violet), GLONASS-only (blue) and combined GPS+GLONASS. Dark shade represents obstruction introduced by a valley in east-west direction.

Podobne ugotovitve so strnili tudi drugi avtorji. Takac in Walford (2006) poleg večje razpoložljivosti signala in ugodnejše geometrijske razporeditve v smeri sever-jug zaradi  $9.8^\circ$  večje inklinacije orbit satelitov GLONASS navajata tudi rahlo izboljšanje natančnosti ( $SD_E = 7$  mm,  $SD_{E\_GG} = 6$  mm,  $SD_N = 9$  mm,  $SD_{N\_GG} = 7$  mm,  $SD_H = 15$  mm,  $SD_{H\_GG} = 13$  mm, pri dolžini baznega vektorja 15 km), v povprečju za 10% hitrejšo inicializacijo, vendar pa za kar 66% krajši najdaljši čas za inicializacijo ( $TTF_{MAX} = 116$  s,  $TTF_{MAX\_GG} = 40$  s), kar bistveno vpliva na dvig produktivnosti. Kot pomembno ugotovitev pa navajata še, da vključitev opazovanj GLONASS ne uvaja sistematičnega pogoška v določitev položaja.

Poudarjata tudi dejstvo, da so opazovanja iz neodvisnih virov, kakršna sta GPS in GLONASS, heterogena. Poleg večje količine združenih opazovanj iz obeh sistemov je treba upoštevati tudi



Delež točnih meritev (odstopanje od pravega položaja <10 cm, odstopanje od prave višine <15 cm) znaša 99.97%. Pri tem je pomembno, da je bila med vsemi grobo pogrešenimi meritvami v 58 primerih grobo pogrešena le višina, položaj le v 12 primerih, samo v enem primeru pa položaj in višina skupaj.

Da bi ugotovili potencialne vzroke za grobe pogreške, so bile pregledane razmere ob pojavu le-teh (preglednice 34 do 41). Pokazatelji potencialnih grobih pogreškov so visoke vrednosti ocen natančnosti (ang. Coordinate Quality, CQ), nizko število satelitov in visoke vrednosti GDOP. Izkazalo se je, da ti pokazatelji niso popolnoma zanesljivi. Če bi namreč obstajala nedvoumna indikacija potencialno grobo pogrešenih meritev, bi to proizvajalci že vgrajevali v sistemsko programsko opremo sprejemnikov GNSS.

Preglednica 34: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: MAC TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 15 km«.

Table 34: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, MAC TRM RTK product, 15 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dP <sub>os</sub> (m)	dh > 3 × 1DCQ	dP <sub>os</sub> > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dP <sub>os</sub> > 0.100 m	Grobi pogrešek
17.9.2011	14:50:37	0.028	0.016	0.032	7	7		2.7	0.008	0.010	0.076	0.013					
17.9.2011	15:11:27	0.039	0.023	0.045	8	8		2.4	0.031	-0.032	0.128	0.045	x				
17.9.2011	15:11:59	0.034	0.019	0.039	7	7		2.7	0.021	-0.047	0.152	0.051	x		x		x
17.9.2011	15:12:33	0.032	0.018	0.037	7	7		2.7	0.019	-0.046	0.158	0.050	x		x		x
17.9.2011	15:16:15	0.024	0.014	0.028	7	7		2.7	0.030	-0.041	0.131	0.051	x	x			
17.9.2011	17:41:51	0.046	0.014	0.048	6	6		8.7	0.008	0.001	0.140	0.008	x				
17.9.2011	17:41:59	0.046	0.014	0.048	6	6		8.7	0.010	-0.001	0.151	0.010	x		x		x
17.9.2011	17:42:07	0.046	0.014	0.049	6	6		8.7	0.011	0.000	0.158	0.011	x		x		x
17.9.2011	17:42:19	0.030	0.015	0.034	7	7		3.7	-0.006	0.015	0.071	0.016					
17.9.2011	17:42:29	0.044	0.014	0.046	6	6		8.6	0.010	0.002	0.153	0.010	x		x		x
17.9.2011	17:42:37	0.043	0.013	0.045	6	6		8.6	0.011	0.006	0.158	0.013	x		x		x
17.9.2011	17:42:45	0.047	0.015	0.050	6	6		8.6	0.012	0.002	0.152	0.012	x		x		x
17.9.2011	17:42:53	0.041	0.013	0.043	6	6		8.6	0.010	0.005	0.137	0.011	x				
17.9.2011	17:43:03	0.026	0.013	0.029	7	7		3.7	-0.005	0.010	0.063	0.011					

Preglednica 35: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: SG GG TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 35: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, SG GG TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
21.9.2011	11:11:24	0.024	0.015	0.028	12	7	5	2.5	-0.004	0.001	-0.004	0.004					
21.9.2011	11:15:07	0.067	0.041	0.078	12	6	6	3.9	-0.045	-0.171	0.133	0.177		x		x	x
21.9.2011	11:15:37	0.065	0.039	0.076	12	6	6	4.0	-0.041	-0.168	0.121	0.173		x		x	x
21.9.2011	11:16:02	0.051	0.030	0.059	12	6	6	4.0	-0.056	-0.193	0.165	0.201	x	x	x	x	x
21.9.2011	11:22:41	0.026	0.014	0.030	14	7	7	2.8	0.001	-0.001	0.004	0.001					
21.9.2011	14:25:48	0.026	0.016	0.031	12	5	7	3.8	0.004	-0.006	-0.002	0.007					
21.9.2011	14:34:37	0.024	0.015	0.029	14	7	7	3.1	-0.036	0.003	0.196	0.036	x		x		x
21.9.2011	14:35:52	0.037	0.023	0.043	14	7	7	3.3	-0.042	0.015	0.204	0.045	x		x		x
21.9.2011	14:36:31	0.043	0.027	0.051	14	7	7	3.3	-0.026	-0.003	0.187	0.026	x		x		x
21.9.2011	14:46:48	0.043	0.025	0.050	14	7	7	3.7	-0.008	-0.004	0.024	0.009					

Preglednica 36: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: SG TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 36: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, SG TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
21.9.2011	11:11:35	0.018	0.011	0.022	7	7		2.5	-0.004	-0.007	-0.002	0.008					
21.9.2011	11:14:51	0.056	0.034	0.066	6	6		3.9	-0.036	-0.172	0.127	0.176		x		x	x
21.9.2011	11:15:27	0.042	0.026	0.049	6	6		4.0	-0.047	-0.180	0.124	0.186		x		x	x
21.9.2011	11:15:53	0.063	0.037	0.073	6	6		4.0	-0.029	-0.163	0.117	0.166		x		x	x
21.9.2011	11:16:09	0.060	0.036	0.070	6	6		4.0	-0.044	-0.175	0.136	0.180		x		x	x
21.9.2011	11:22:47	0.022	0.012	0.025	7	7		2.8	0.002	0.003	-0.003	0.004					
21.9.2011	14:26:07	0.036	0.022	0.042	5	5		3.8	0.002	0.003	0.004	0.004					
21.9.2011	14:34:28	0.024	0.015	0.028	7	7		3.1	-0.032	0.003	0.190	0.032	x		x		x
21.9.2011	14:35:04	0.035	0.022	0.041	7	7		3.1	-0.037	0.012	0.203	0.039	x		x		x
21.9.2011	14:36:12	0.043	0.027	0.050	7	7		3.3	-0.028	-0.004	0.197	0.028	x		x		x
21.9.2011	14:37:03	0.039	0.024	0.046	7	7		3.3	-0.041	0.009	0.202	0.042	x		x		x
21.9.2011	14:46:52	0.035	0.020	0.040	7	7		3.7	-0.006	-0.004	0.015	0.007					



Preglednica 37: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: MAC TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 37: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, MAC TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov			Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji					
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
2.10.2011	9:41:03	0.020	0.020	0.028	7	7		1.9	-0.001	0.002	0.037	0.002					
2.10.2011	9:43:11	0.020	0.026	0.033	5	5		3.2	-0.147	-0.182	0.008	0.234		x		x	x
2.10.2011	9:45:40	0.020	0.020	0.028	6	6		2.9	-0.018	-0.005	0.025	0.019					
2.10.2011	9:46:02	0.020	0.021	0.029	6	6		2.9	-0.017	-0.004	0.034	0.017					
2.10.2011	9:46:34	0.028	0.030	0.041	6	6		2.9	-0.031	-0.029	0.027	0.042					
2.10.2011	9:49:10	0.021	0.024	0.032	5	5		3.2	0.077	0.112	0.019	0.136		x		x	x
2.10.2011	9:51:18	0.023	0.023	0.033	6	6		3.0	-0.021	-0.032	0.020	0.038					
2.10.2011	14:06:16	0.032	0.020	0.038	7	7		3.9	-0.054	0.039	0.145	0.067	x	x			
2.10.2011	14:06:32	0.038	0.024	0.045	7	7		3.9	-0.057	0.039	0.156	0.069	x		x		x
2.10.2011	14:06:52	0.046	0.029	0.054	7	7		3.9	-0.058	0.041	0.158	0.071	x		x		x
2.10.2011	14:07:14	0.045	0.028	0.053	7	7		3.9	-0.059	0.044	0.159	0.074	x		x		x
2.10.2011	14:07:42	0.049	0.030	0.058	6	6		4.3	-0.059	0.040	0.177	0.071	x		x		x
2.10.2011	14:08:06	0.047	0.029	0.056	7	7		3.9	-0.072	0.056	0.194	0.091	x	x	x		x
2.10.2011	14:08:34	0.043	0.027	0.051	7	7		3.9	-0.067	0.048	0.183	0.082	x	x	x		x
2.10.2011	14:09:08	0.049	0.030	0.058	7	7		3.9	-0.065	0.050	0.186	0.082	x		x		x
2.10.2011	14:13:03	0.115	0.055	0.127	6	6		8.5	-0.021	-0.002	0.000	0.021					
2.10.2011	14:13:23	0.057	0.033	0.065	7	7		3.8	-0.047	0.015	0.085	0.049					

Preglednica 38: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: SIGNAL, proizvod RTK: VRS TRM, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 38: Overview of outliers for the case: SIGNAL network, VRS TRM RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov			Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji					
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
2.10.2011	8:35:39	0.020	0.012	0.024	6	6		2.0	-0.019	0.027	-0.013	0.033					
2.10.2011	8:37:37	0.041	0.024	0.047	5	5		5.1	-0.052	-0.068	0.281	0.086	x	x	x		x
2.10.2011	8:37:53	0.045	0.026	0.052	5	5		5.1	-0.051	-0.076	0.283	0.092	x	x	x		x
2.10.2011	8:38:09	0.048	0.028	0.055	5	5		5.0	-0.047	-0.077	0.286	0.090	x	x	x		x
2.10.2011	8:38:25	0.049	0.029	0.057	5	5		5.0	-0.043	-0.077	0.287	0.088	x	x	x		x
2.10.2011	8:38:45	0.056	0.033	0.065	5	5		5.0	-0.045	-0.068	0.271	0.082	x		x		x

2.10.2011	8:44:09	0.029	0.019	0.034	5	5		2.8	0.016	-0.023	0.045	0.028					
2.10.2011	9:40:04	0.026	0.023	0.035	7	7		1.9	0.008	0.006	0.048	0.010					
2.10.2011	9:43:37	0.029	0.035	0.045	5	5		3.2	-0.132	-0.168	0.030	0.214		x		x	x
2.10.2011	9:44:03	0.018	0.023	0.029	5	5		3.2	-0.156	-0.186	-0.013	0.243		x		x	x
2.10.2011	9:45:09	0.021	0.022	0.031	6	6		2.9	-0.014	0.002	0.017	0.014					
2.10.2011	9:45:24	0.022	0.023	0.032	6	6		2.9	-0.021	0.000	0.023	0.021					
2.10.2011	9:45:40	0.022	0.023	0.032	6	6		2.9	-0.034	-0.016	0.009	0.038					
2.10.2011	9:45:58	0.030	0.029	0.042	6	6		2.9	-0.031	-0.023	0.023	0.039					
2.10.2011	9:48:44	0.039	0.037	0.053	6	6		2.9	0.058	0.100	0.015	0.116		x		x	x
2.10.2011	9:49:03	0.032	0.033	0.046	6	6		2.9	0.058	0.101	0.023	0.116		x		x	x
2.10.2011	9:49:21	0.022	0.026	0.034	5	5		3.3	0.047	0.079	0.012	0.092		x			
2.10.2011	13:46:45	0.024	0.018	0.030	6	6		3.3	-0.037	0.018	0.148	0.041		x			
2.10.2011	13:46:57	0.024	0.018	0.030	6	6		3.3	-0.038	0.014	0.155	0.040		x		x	x
2.10.2011	13:47:12	0.026	0.020	0.032	6	6		3.3	-0.037	0.013	0.135	0.039		x			
2.10.2011	13:47:21	0.024	0.018	0.030	6	6		3.3	-0.035	0.015	0.154	0.038		x		x	x
2.10.2011	13:47:35	0.032	0.025	0.041	6	6		3.3	-0.035	0.017	0.146	0.039		x			
2.10.2011	13:54:29	0.046	0.033	0.056	6	6		3.9	-0.026	0.006	0.115	0.027					
2.10.2011	13:54:47	0.036	0.026	0.045	6	6		4.0	-0.037	0.020	0.128	0.042		x			
2.10.2011	13:55:44	0.060	0.043	0.074	7	7		3.5	-0.048	0.038	0.186	0.061		x		x	x
2.10.2011	13:55:50	0.030	0.022	0.037	7	7		3.5	-0.032	0.016	0.175	0.036		x		x	x
2.10.2011	13:56:02	0.039	0.029	0.049	7	7		3.5	-0.047	0.035	0.196	0.059		x		x	x
2.10.2011	13:56:20	0.036	0.026	0.045	7	7		3.5	-0.042	0.022	0.180	0.047		x		x	x
2.10.2011	13:56:40	0.038	0.027	0.047	7	7		3.5	-0.043	0.026	0.175	0.050		x		x	x
2.10.2011	13:57:27	0.032	0.023	0.039	7	7		3.6	-0.052	0.037	0.196	0.064		x		x	x
2.10.2011	13:57:45	0.036	0.025	0.044	7	7		3.6	-0.047	0.027	0.180	0.054		x		x	x
2.10.2011	13:57:59	0.036	0.025	0.043	7	7		3.6	-0.045	0.033	0.180	0.056		x		x	x
2.10.2011	13:58:12	0.043	0.030	0.052	7	7		3.6	-0.051	0.035	0.174	0.062		x		x	x
2.10.2011	13:58:25	0.037	0.026	0.046	7	7		3.6	-0.049	0.038	0.183	0.062		x		x	x
2.10.2011	13:58:33	0.038	0.026	0.046	7	7		3.6	-0.047	0.038	0.182	0.060		x		x	x
2.10.2011	13:58:42	0.043	0.030	0.052	7	7		3.6	-0.051	0.044	0.176	0.067		x		x	x
2.10.2011	13:58:52	0.036	0.025	0.044	7	7		3.6	-0.048	0.038	0.169	0.061		x		x	x
2.10.2011	13:59:01	0.035	0.024	0.043	7	7		3.6	-0.044	0.027	0.172	0.052		x		x	x
2.10.2011	13:59:09	0.036	0.025	0.044	7	7		3.6	-0.046	0.029	0.172	0.054		x		x	x
2.10.2011	13:59:18	0.037	0.026	0.045	7	7		3.6	-0.046	0.029	0.155	0.054		x		x	x
2.10.2011	13:59:27	0.037	0.026	0.045	7	7		3.7	-0.041	0.022	0.157	0.047		x		x	x
2.10.2011	13:59:39	0.037	0.026	0.045	7	7		3.7	-0.038	0.020	0.154	0.043		x		x	x
2.10.2011	13:59:53	0.042	0.029	0.051	7	7		3.7	-0.026	0.009	0.130	0.028		x			
2.10.2011	14:02:41	0.175	0.089	0.196	6	6		13.4	-0.063	0.038	0.230	0.074				x	
2.10.2011	14:05:53	0.101	0.050	0.113	6	6		12.6	-0.032	0.017	0.137	0.036					
2.10.2011	14:06:08	0.039	0.025	0.047	7	7		3.9	-0.050	0.034	0.184	0.060		x		x	x
2.10.2011	14:06:22	0.038	0.024	0.045	7	7		3.9	-0.059	0.037	0.195	0.070		x		x	x
2.10.2011	14:06:37	0.042	0.026	0.050	7	7		3.9	-0.059	0.034	0.206	0.068		x		x	x
2.10.2011	14:06:51	0.045	0.029	0.054	7	7		3.9	-0.060	0.035	0.202	0.069		x		x	x
2.10.2011	14:06:58	0.032	0.019	0.037	6	6		4.3	-0.053	0.033	0.204	0.062		x	x	x	x
2.10.2011	14:07:12	0.038	0.023	0.044	7	7		3.9	-0.052	0.026	0.194	0.058		x		x	x
2.10.2011	14:07:20	0.043	0.027	0.051	7	7		3.9	-0.056	0.032	0.202	0.064		x		x	x
2.10.2011	14:07:34	0.038	0.023	0.044	6	6		4.3	-0.055	0.036	0.215	0.066		x		x	x

2.10.2011	14:11:35	0.072	0.043	0.084	7	7		3.8	-0.058	0.017	0.175	0.060			x	
-----------	----------	-------	-------	-------	---	---	--	-----	--------	-------	-------	-------	--	--	---	--

Preglednica 39: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: NEAREST LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 39: Overview of outliers for the case: own network, NEAREST LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
3.10.2011	8:12:09	0.059	0.033	0.068	7	7		2.1	-0.018	0.021	0.050	0.028					
3.10.2011	8:30:26	0.032	0.021	0.038	7	7		1.9	-0.060	-0.056	0.225	0.082	x	x	x		x
3.10.2011	8:31:16	0.022	0.014	0.026	7	7		1.9	-0.004	0.011	0.000	0.012					

Preglednica 40: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: i-MAX LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

Table 40: Overview of outliers for the case: own network, i-MAX LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
2.10.2011	15:42:15	0.029	0.020	0.035	7	7		3.0	-0.017	-0.039	0.121	0.043	x				
2.10.2011	15:42:29	0.035	0.024	0.042	8	8		3.0	-0.020	-0.040	0.157	0.045	x		x		x
2.10.2011	15:42:43	0.035	0.024	0.042	8	8		3.0	-0.017	-0.031	0.134	0.035	x				

Preglednica 41: Pregled grobo pogrešenih meritev za primer »Omrežje: GNSS Spider, proizvod RTK: ViRS LEI, oddaljenost od najbližje referenčne postaje: 30 km«.

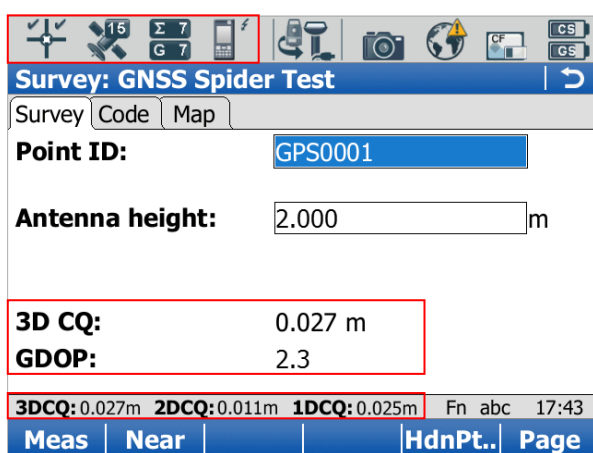
Table 41: Overview of outliers for the case: own network, ViRS LEI RTK product, 30 km distance from nearest reference station.

Meritev		Ocena natančnosti			Stanje satelitov				Odstopanje od prave vrednosti				Kriteriji				
Datum	Čas	1D CQ (m)	2D CQ (m)	3D CQ (m)	Število vseh satelitov	Št. satelitov GPS	Št. satelitov GLONASS	GDOP	dE (m)	dN (m)	dh (m)	dPos (m)	dh > 3 × 1DCQ	dPos > 3 × 2DCQ	dh > 0.150 m	dPos > 0.100 m	Grobi pogrešek
2.10.2011	15:42:16	0.040	0.027	0.048	8	8		3.0	-0.012	-0.025	0.137	0.028	x				
2.10.2011	15:42:27	0.035	0.024	0.043	8	8		3.0	-0.019	-0.039	0.151	0.043	x		x		x
2.10.2011	15:42:34	0.034	0.023	0.041	8	8		3.0	-0.015	-0.021	0.133	0.026	x				

Grobi pogreški so se pojavili v razmerah, ko je bila vrednost DOP večja od 5, kadar je ocena natančnosti višine presegala 0.040 m, kadar je sprejemnik sledil samo 5 satelitov, včasih pa navidezno tudi brez razloga. V povezavi s pojavom grobih pogreškov določitve položaja so bile večkrat opažene tudi razmere, ko je prišlo do spremembe števila satelitov, na primer, ko je takoj po fazni določitvi število satelitov padlo za 1, pa tudi takrat, ko se je v rešitvi pojavil nov satelit. Zelo pogosto je bila meritev grobo pogrešena, če se pred tem instrument dolgo časa (na primer več minut, 10 minut ali še več) ni mogel inicializirati. Kadar se instrument dlje časa ne inicializira, pomeni, da ne more zanesljivo določiti neznanega števila celih valov (na primer razmerje med prvo in drugo najverjetnejšo rešitvijo je prenizko, dvojna kontrola inicializacije ni uspela).

Sprejemniki GNSS proizvajalca Leica Geosystems vsakih nekaj sekund opravijo po dve neodvisni inicializaciji, ki jo sprejmejo pod pogojem, da je v obeh primerih rezultat skladen. Uporabniku to signalizirajo z znakom dveh kljukic v vrstici stanja na vrhu zaslona. Kljukici se periodično pojavljata na zaslonu ves čas merjenja, z vsako novo neodvisno določitvijo fazne nedoločenosti, ki ustreza kriterijem kakovosti.

Uporabniku je poleg vrstice stanja na vrhu zaslona na voljo še sporočilna vrstica (spodaj, nad funkcijskimi tipkami) ter uporabniško nastavljiva polja (v glavnem delu zaslona), ki mu posredujejo najpomembnejše pokazatelje kakovosti določitve položaja: tip rešitve, uspešnost določitve fazne nedoločenosti, število uporabljenih satelitov, stanje povezave RTK, ocene natančnosti ter vrednost GDOP, kot prikazuje slika 114.



Slika 114: Pokazatelji kakovosti določitve položaja na zaslonu terenskega kontrolerja Leica Viva CS15.  
*Figure 114: Survey screen of Leica Viva CS15 field controller with different quality indicators that are presented to the operator during the measurements.*

Redno periodično (približno vsakih 10 do 20 s) pojavljanje kljukic v vrstici stanja pomeni, da sprejemnik GNSS uspešno ponovno in neodvisno (iz nove množice opazovanj) določi fazne nedoločenosti in da so vse kontrole dobljenih rezultatov uspešno opravljene. Če sprejemnik ne more na novo določiti neznanega števila celih valov, lahko samo ohrani zadnje veljavne vrednosti, vendar jih vzdržuje le do določene stopnje šuma v meritvah. Kadar sprejemnik več minut ali celo več deset minut ne more ponovno določiti neznanega števila celih valov, obstaja potencialna nevarnost, da bo prvih nekaj meritev po določitvi grobo pogrešenih. Domnevo so potrdili tudi razvojniki algoritmov RTK pri proizvajalcu Leica Geosystems v avtorjevi osebni korespondenci. Za uporabnika je zato ključno spremljanje rednega pojavljanja kljukic, hkrati pa ne sme spregledati splošno sprejetih kriterijev

(GDOP < 5, najmanjše število uporabljenih satelitov 5 ali še bolje 6), posebej pa mora biti pozoren na velikost ocene natančnosti. Potencialna nevarnost grobega pogreška se najhitreje odrazi v visoki vrednosti ocene natančnosti višine, na primer več kot 0.040 m.

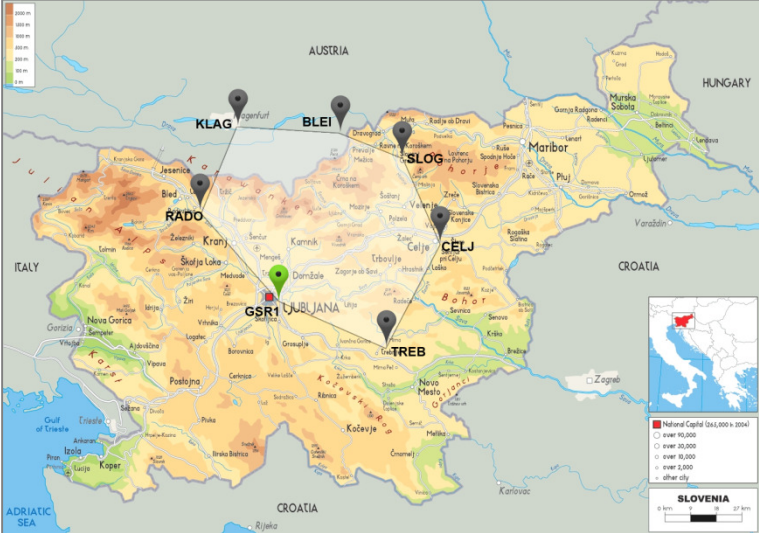
### 5.1.7 Oblikovanje celice

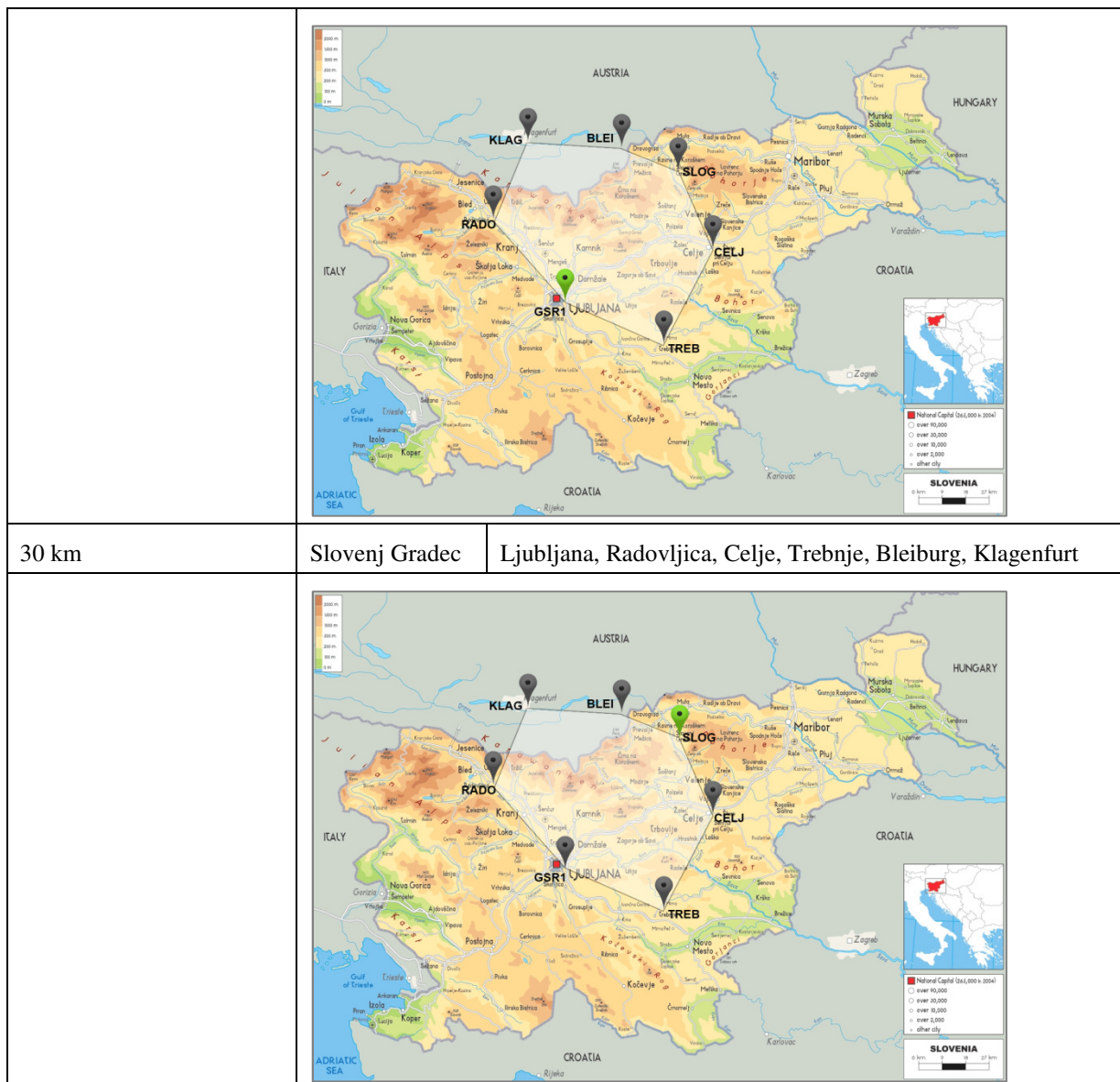
Oblikovanje celice je bilo preverjeno pri testu primerjave omrežja SIGNAL in lastnega omrežja, pri katerem sta bila hkrati uporabljena proizvoda MAC TRM in MAX LEI, in sicer pri vseh oddaljenostih od najbližje referenčne postaje.

V primeru omrežja SIGNAL je celico praktično vedno sestavljalo 7 referenčnih postaj (1 glavna in 6 pomožnih), razlika je bila le v izbiri glavne postaje. Število pomožnih postaj v celici (6) operater v programu Trimble VRS<sup>3</sup>Net lahko ustrezno nastavi v uporabniškem vmesniku. Ves čas meritve je bilo v celico vključenih istih 7 referenčnih postaj GNSS, kakor je prikazano v preglednici 42.

Preglednica 42: Oblika celice in vključene referenčne postaje v primeru omrežja SIGNAL pri različnih oddaljenostih od najbližje referenčne postaje.

Table 42: Reference stations included in a cell of SIGNAL network at different distances from nearest reference station.

Oddaljenost od najbližje referenčne postaje	Glavna postaja	Pomožne postaje
5 km	Ljubljana	Slovenj Gradec, Radovljica, Celje, Trebnje, Bleiburg, Klagenfurt
		
	15 km	Ljubljana



Pri lastnem omrežju je bilo opaziti večjo dinamiko pri izbiri pomožnih postaj, glavna postaja se je sicer spremenila le v nekaj primerih zaradi izpada komunikacije med Geodetskim inštitutom in Geoservisom ali zaradi zamujanja opazovanj z referenčne postaje. Leica GNSS Spider ne omogoča operaterju poseganja v način oblikovanja (samodejne) celice niti v število pomožnih postaj v celici. Programska oprema to samodejno prilagaja glede na dejanske razmere v omrežju, kot je to opisano v poglavju *Sistemska arhitektura in delovanje programa Leica GNSS Spider*. Kot primer je v preglednici 43 prikazana situacija pri oddaljenosti od najbližje referenčne postaje 15 km. Razvidno je, da Leica GNSS Spider pogosto pošilja popravke RTK tudi za 10 in več pomožnih postaj, kar pa ne pomeni, da premični sprejemnik pri določitvi svojega položaja tudi uporablja opazovanja vseh teh postaj.

Avtor je z osebno korespondenco preveril oblikovanje celice v programu Leica GNSS Spider. To področje je bilo v različicah po 4.1 predmet številnih izboljšav in optimizacij. V aktualni različici 4.4 se celica privzeto tvori iz 1 glavne in (do) 5 pomožnih postaj, nastavitve števila pomožnih postaj pa je možna samo v registru in ni na voljo v uporabniškem vmesniku.

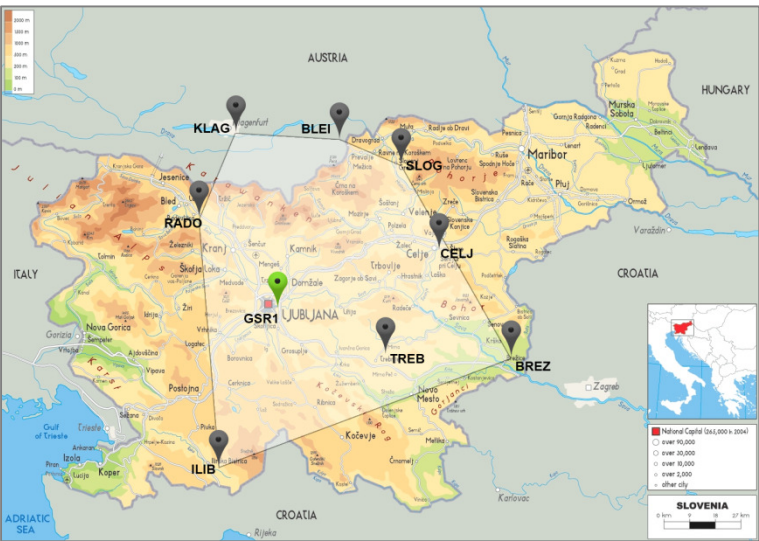
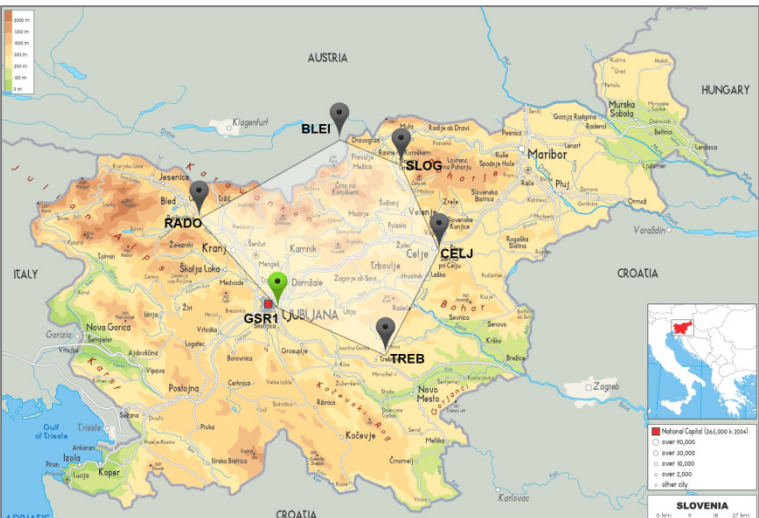
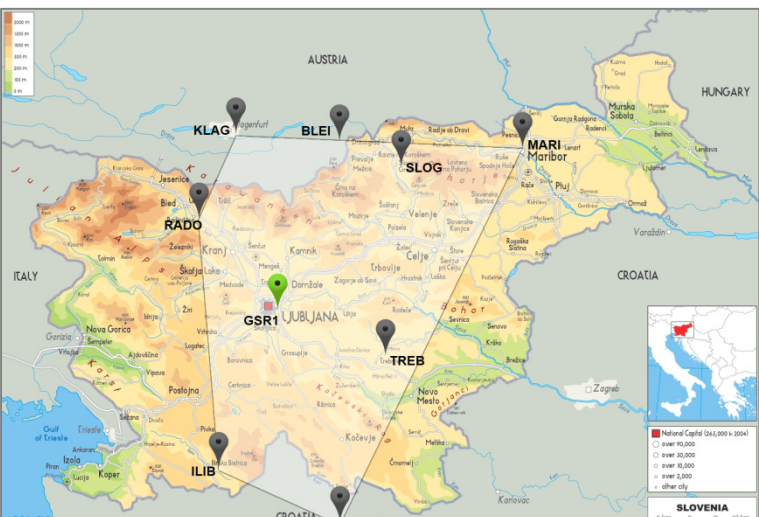


Vpliv oblikovanja celice je preučevala že Geislerjeva (2006). Vključitev večjega števila pomožnih postaj v celico omogoča premičnemu sprejemniku kompleksnejše modeliranje ionosfere na večjem območju. Zagovorniki drugih mrežnih konceptov pa v tem vidijo nepotrebno večanje potrebne pasovne širine za prenos popravkov RTK.

Preglednica 43: Oblika celice in vključene referenčne postaje v primeru lastnega omrežja pri oddaljenosti 15 km od najbližje referenčne postaje.

Table 43: Reference stations included in a cell of own network at different distances from nearest reference station.

Čas	Glavna postaja	Število pomožnih postaj in seznam
27.09.2011 10:43:32	Ljubljana	5: Bleiburg, Celje, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje
	Ljubljana	7: Ilirska Bistrica, Bleiburg, Celje, Klagenfurt, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje
27.09.2011 13:45:28	Ljubljana	8: Ilirska Bistrica, Bleiburg, Brežice, Celje, Klagenfurt, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje

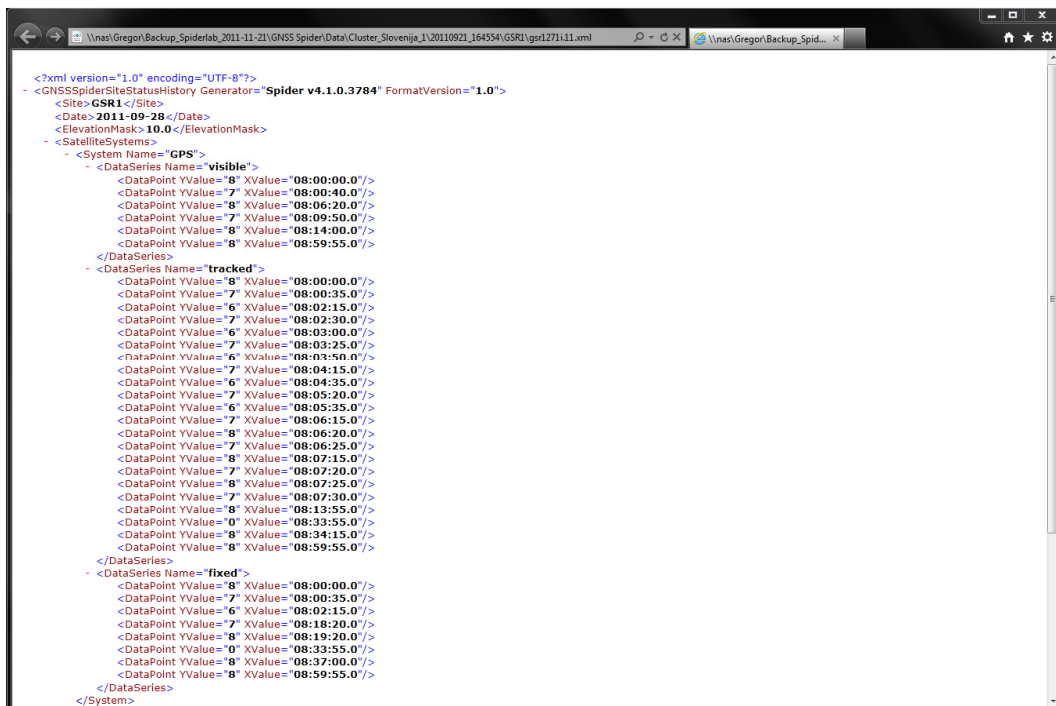
		
<p>27.09.2011 14:23:48</p>	<p>Ljubljana</p>	<p>5: Bleiburg, Celje, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje</p>
		
<p>27.09.2011 15:31:12</p>	<p>Ljubljana</p>	<p>8: Ilirska Bistrica, Bleiburg, Delnice, Klagenfurt, Radovljica, Maribor, Slovenj Gradec, Trebnje</p>
		



27.09.2011 15:32:58	Ljubljana	10: Ilirska Bistrica, Bleiburg, Brežice, Delnice, Celje, Klagenfurt, Radovljica, Maribor, Slovenj Gradec, Trebnje
...		
28.09.2011 10:23:28	Ljubljana	5: Bleiburg, Celje, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje

28.09.2011 10:34:22	Trebnje	5: Bleiburg, Delnice, Celje, Radovljica, Slovenj Gradec
28.09.2011 10:37:10	Ljubljana	5: Bleiburg, Celje, Radovljica, Slovenj Gradec, Trebnje
...		

Za primer je bila raziskana situacija 28.09.2011, ob 10:34:22 (UTC+2; na premičnih sprejemnikih je bil nastavljen prikaz lokalnega časa), ki je v preglednici označena sivo. Takrat je bila pri nekaj meritvah za glavno postajo izbrana referenčna postaja Trebnje. Pregled dnevniške datoteke (slika 115) iz programskega paketa Leica GNSS Spider je pokazal, da v času med 08:33:55 (UTC) in 08:34:15 (UTC) referenčna postaja Ljubljana (GSR1) ni sledila satelitov. Uspešno je bilo ponovno fazno določenih vseh 8 razpoložljivih satelitov ob 08:37:00 (UTC), nato pa je bila na premičnem sprejemniku ob 10:37:10 (UTC+2) referenčna postaja Ljubljana ponovno uporabljena kot glavna postaja.



Slika 115: Dnevniška datoteka mrežnega algoritma omogoča preprosto odkrivanje potencialnih vzrokov za težave v omrežju, saj za vsak trenutek prikazuje število vidnih satelitov, število satelitov, za katera so na voljo opazovanja in število fazono določenih satelitov.

Figure 115: Cluster server log files allow network operator an easy way to discover potential sources of weak network performance. They store the history of visible, tracked and fixed satellites.

### 5.1.8 Kakovost danih koordinat referenčnih postaj

Pri testu vpliva dolžine trajanja meritve se je izpostavil še en problem. Pri določitvi koordinat testne točke Arnače je bilo ugotovljeno, da so rešitve z okoliških postaj Ljubljana, Trebnje in Slovenj Gradec med seboj usklajene, v rešitvi s postaje Celje pa je prisotno sistematično odstopanje višine od 24 mm in 32 mm glede na srednjo vrednost višine določene z ostalih treh referenčnih postaj. Celjska postaja je bila zato pri določitvi koordinat izločena. Podrobnosti so predstavljene v poglavju *Izbira in določitev koordinat testne točke Arnače*.

Preglednica 44: Koordinate testne točke Arnače, določene z različnih referenčnih postaj omrežja SIGNAL.  
Table 44: Final coordinates of the point Arnače determined from different reference stations of SIGNAL network.

Določene z referenčnih postaj Ljubljana, Trebnje in Slovenj Gradec	Določene z referenčne postaje Celje
Y = 508486.236 m	Y = 508486.242 m
X = 133192.989 m	X = 133192.975 m
h = 439.919 m	h = 439.946 m

Pri analizi meritev RTK na testni točki Arnače pa se je ponovno pojavil sistematični pogrešek višine v velikosti od 25 mm do 28 mm. Po pregledu zapisnikov je bilo ugotovljeno, da je bila v testu kot glavna postaja skoraj vedno uporabljena referenčna postaja Celje (Ref Station ID=8), zato je položaj novih točk določen glede na položaj referenčne postaje Celje. V potrditev te domneve je bil opravljen

še en preračun vpliva dolžine trajanja meritve, pri katerem so bile uporabljene koordinate testne točke Arnače, pridobljene samo z referenčne postaje Celje. V tem primeru so vsa sistematična odstopanja pri meritvah izginila (standardne deviacije vseh koordinat so enake vrednostim RMS), kar je razvidno iz preglednic 45 in 46.

Preglednica 45: Rezultati meritev na testni točki Arnače za primer: čas trajanja meritve 10 s, koordinate točke določene z referenčnih postaj Ljubljana, Trebnje in Slovenj Gradec.

Table 45: Overview of test results at the point Arnače for the case: 10 s measurement interval, final coordinates determined from reference stations Ljubljana, Trebnje and Slovenj Gradec.

	<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>h</b>
<b>Srednja vrednost koordinat</b>	508486.242 m	133192.972 m	439.944 m
<b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b>	-0.006 m	0.017 m	-0.025 m
<b>Standardna deviacija</b>	0.007 m	0.014 m	0.024 m
<b>RMS</b>	0.009 m	0.022 m	0.034 m
<b>Največje odstopanje meritve (+)</b>	0.008 m	0.065 m	0.023 m
<b>Največje odstopanje meritve (-)</b>	-0.021 m	-0.013 m	-0.099 m

Preglednica 46: Rezultati meritev na testni točki Arnače za primer: čas trajanja meritve 10 s, koordinate točke določene z referenčne postaje Celje.

Table 46: Overview of test results at the point Arnače for the case: 10 s measurement interval, final coordinates determined from reference station Celje.

	<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>h</b>
<b>Srednja vrednost koordinat</b>	508486.242 m	133192.972 m	439.944 m
<b>Odstopanje sredine od prave vrednosti</b>	0.000 m	0.003 m	0.002 m
<b>Standardna deviacija</b>	0.007 m	0.014 m	0.024 m
<b>RMS</b>	0.007 m	0.014 m	0.024 m
<b>Največje odstopanje meritve (+)</b>	0.014 m	0.051 m	0.050 m
<b>Največje odstopanje meritve (-)</b>	-0.015 m	-0.027 m	-0.072 m

Ugotovitev nakazuje na prisotnost grobih pogoškov v koordinatah referenčnih točk v omrežju SIGNAL.

### 5.1.9 Analiza potrebne pasovne širine za prenos popravkov RTK

V lastnem omrežju je bila količina podatkov za proizvode »Nearest«, »ViRS\_Slovenija« in »i-MAX\_Slovenija«, ki so jih iz omrežja sprejemali premični sprejemniki GNSS, skoraj enaka. Večja količina podatkov v primeru proizvoda »Nearest« je bila pričakovana, saj v tem primeru omrežje pošilja opazovanja oziroma popravke za vse satelite, ki jih sledi najbližja referenčna postaja, v primeru individualiziranih mrežnih proizvodov »ViRS« in »i-MAX« pa samo za tiste, za katere so na voljo mrežni popravki.

Iz preglednice 23 je razvidna tudi edina opaznejša slabost popravkov po konceptu MAC, saj količina podatkov iz omrežja za približno 70% presega količino podatkov v primerih, ko se interpolacija

sistematičnih pogreškov na opazovanja opravi v centru omrežja GNSS. Kljub temu pa količina prenesenih podatkov v primeru uporabe proizvoda MAX LEI še vedno znaša le približno 1.1 MB/h. Količina prenesenih podatkov je pomembna za uporabnike storitev RTK, saj je to mera za obračun s strani mobilnih operaterjev.

Za praktičen primer je bil vzet Mobitelov paket Telemetrija, kjer uporabnik za 3.04 EUR mesečne naročnine na paket in 4.06 EUR mesečne naročnine za storitev Telemetrija 100 MB, dobi predplačanih 100 MB prenosa podatkov (Telekom Slovenije d.d.). V primeru uporabe proizvoda MAX LEI predplačana količina podatkov zadostuje za približno 95 ur uporabe, kar pri 22 delovnih dnevih na mesec pomeni, da uporabnik lahko vsak dan neprekinjeno meri več kot 4.3 ure. V primeru uporabe individualiziranih mrežnih proizvodov i-MAX LEI ali ViRS LEI pa ta količina podatkov zadošča za skoraj 160 ur uporabe, kar pomeni več kot 7.2 ure neprekinjenega merjenja vsak delovni dan. Vendar pa se bo količina podatkov ob vključitvi opazovanj GLONASS povečala za dobrih 80%. Ta vrednost je bila ocenjena na osnovi 3-urne meritve količine prenesenih podatkov različnih proizvodov RTK z referenčne postaje Geoservis.

Nepričakovana je približno 2.5-krat večja količina podatkov v primeru mrežnih proizvodov MAC TRM in VRS TRM iz omrežja SIGNAL. Predplačana količina 100 MB bi v primeru MAC zadoščala le za 1.7 ure meritev vsak delovni dan. Vzrokov za tako veliko količino prenesenih podatkov je več. Lahko se v omrežju SIGNAL v primeru mrežnih proizvodov RTK pošiljajo tudi podatki za satelite GLONASS ter podatki satelitov, ki so manj kot  $10^\circ$  nad horizontom<sup>28</sup>, sicer pa razlike lahko izvirajo še iz različnih intervalov pošiljanja opazovanj glavne postaje ter ionsferskih in geometričnih popravkov pomožnih postaj in tipov sporočil, ki sestavljajo niz popravkov RTK (na primer kompaktno sporočilo 1003 ali razširjeno sporočilo 1004). Kljub čedalje večji dostopnosti brezžičnih širokopasovnih povezav mora upravljavec omrežja GNSS vseeno preiščeno nastaviti intervale pošiljanja za posamezna sporočila, ki morajo zagotavljati najmanjšo potrebno količino prenesenih podatkov ob najmanjšem vplivu na kakovost pridobljenih rezultatov. Nenazadnje mora upravljavec omrežja zagotavljati in plačevati pasovno širino za svoj internetni priključek za sprejem surovih podatkov z vseh referenčnih postaj v omrežje, hkrati pa tudi pasovno širino za vse uporabnike storitev RTK, ki so hkrati povezani v omrežje GNSS. Tudi smiselnost pošiljanja popravkov RTK za satelite, ki so nizko nad obzorjem (višinski kot pod  $10^\circ$ ), je vprašljiva, saj večina premičnih sprejemnikov GNSS v komercialnih aplikacijah sledi le satelite z višinskim kotom nad  $10^\circ$ . Obenem se porabi bistveno več procesorske moči in časa na osrednjem računalniku v postopku iskanja neznanih celih števil valov za celotno omrežje referenčnih postaj, saj so sateliti z nizkim višinskim kotom bolj podvrženi vplivom atmosfere, kar kvarno vpliva na modeliranje vplivov na opazovanja.

Iz avtorjeve osebne korespondence z upravljavcem omrežja SIGNAL so bile pridobljeni tudi podatki o nastavitvah proizvoda MAC TRM:

- višinski kot  $0^\circ$ ,
- pošiljanje koordinat referenčne antene (sporočilo 1005) in podatkov o anteni (sporočili 1007 in 1033) z intervalom 5 s,
- pošiljanje podatkov o opazovanjih (sporočilo 1004) z intervalom 1 s,
- samodejna izbira celice,
- število pomožnih postaj 6,

---

<sup>28</sup> Povprečno število vidnih satelitov v enem dnevu je v primeru GPS 8.5 pri višinskem kotu  $10^\circ$ , oziroma 11.1 pri višinskem kotu  $0^\circ$ , v primeru GPS+GLONASS pa 15.7 pri višinskem kotu  $10^\circ$ , oziroma 20.4 pri višinskem kotu  $0^\circ$ . Uporabljen je bil almanah iz dne 18.08.2013.

- pošiljanje podatkov o položaju pomožnih postaj (sporočilo 1014) z intervalom 1 s, za eno pomožno postajo naenkrat,
  - pošiljanje ionosferskih popravkov (sporočilo 1015) z intervalom 1 s, pri čemer se vsakič pošiljajo popravki za vse pomožne postaje,
  - pošiljanje geometričnih popravkov (sporočilo 1016) z intervalom 1 s, pri čemer se vsakič pošiljajo popravki za vse pomožne postaje,
- kar potrjuje zgornje domneve.

Programska oprema Leica GNSS Spider upravljavcu omrežja ponuja bistveno manj možnosti nastavljanja različnih parametrov, kar na prvi pogled lahko pomeni manjšo fleksibilnost. Tako lahko pri nastavitvi na primer mrežnega proizvoda MAC upravljavec izbere le kompakten ali razširjen zapis podatkov (RTCM3.x Compact ali Extended) ter intervale pošiljanja podatkov o koordinatah (5 s), opazovanj glavne referenčne postaje (1 s) ter razlik popravkov disperznih in nedisperznih vplivov (5 s). Vendar pa takšna »omejitev« za upravljavca predstavlja tudi varnost in hkrati zagotovilo, da bodo vedno izbrani optimalni parametri delovanja za skoraj vse komercialne aplikacije. Podrobno so bile možnosti pošiljanja proizvodov RTK opisane v poglavju *Nastavitev lastnega omrežja GNSS*.

--- Ta stran je namenoma prazna ---

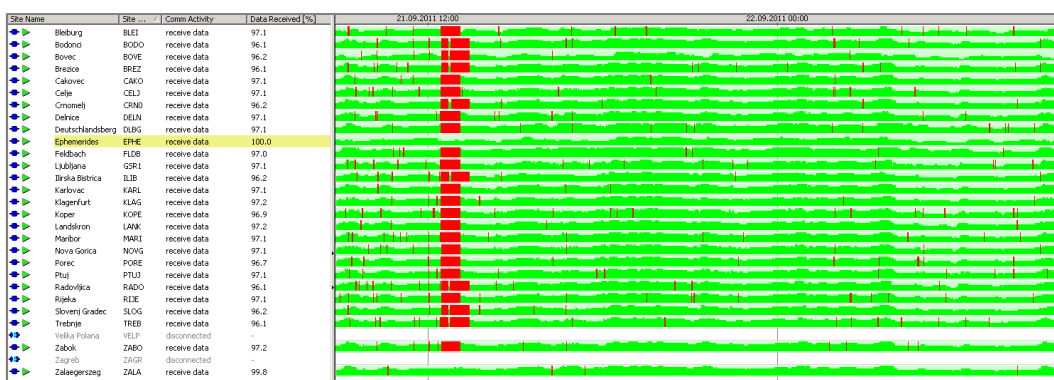


## 6 ZAKLJUČEK

### 6.1 Začetni napori

Zagotovitev vseh potrebnih pogojev za vzpostavitev lastnega omrežja – od pridobivanja programske in merske opreme, do urejanja dostopov do podatkov referenčnih postaj, je bila velik logistični in časovni zalogaj. Tudi zato, ker je bilo treba preveriti številne nastavitve, protokole in parametre, predno je bil vzpostavljen (sorazmerno) zanesljiv tok podatkov z referenčnih postaj do osrednjega strežnika lastnega omrežja.

Pri vzpostavljanju lastnega omrežja je bila ugotovljena tudi omejitev v programski opremi Trimble VRS<sup>3</sup>Net, ki je omejevala število hkratnih povezav NTRIP z istim uporabniškim imenom na 10. Omejitev je bila v sodelovanju z upravljavcem omrežja SIGNAL in ob pomoči proizvajalca programske opreme Trimble odpravljena (parameter postavljen na 30).



Slika 116: Prikaz zgodovine stanja podatkovnih tokov omogoča upravljavcu omrežja GNSS preprosto odkrivanje potencialnih komunikacijskih težav.

*Figure 116: Raw data status allows simple discovery of potential communication weaknesses in GNSS networks.*

Pri ugotavljanju in odpravljanju takšnih (s stališča končnih uporabnikov sicer popolnoma smiselnih) omejitev (varovalk) na strani programske opreme ter pri ugotavljanju vzrokov komunikacijskih težav je bilo v pomoč tudi dejstvo, da je bil do madžarske referenčne postaje ZALA dostop urejen preko NTRIP Casterja madžarskega omrežja (izključen vpliv Geodetskega inštituta), do referenčne postaje GNSS Geoservis pa preko neposredne povezave TCP/IP, saj je postaja vključena v isto lokalno omrežje kot osrednji strežnik lastnega omrežja (s tem je bil izključen vpliv internetne povezave na Geoservis). S tremi različnimi in neodvisnimi načini dostopa do podatkov referenčnih postaj je bilo lažje odkrivati potencialne vzroke težav.

### 6.2 Ugotovitve in predlogi za uporabnike omrežij GNSS

Raziskava, opravljena v sklopu tega dela, je pokazala, da enoličnega pravila, kdaj lahko pri izmeri RTK-GNSS pride do grobega pogoška določitve položaja, ni. Do grobega pogoška je prišlo, kadar je bilo število satelitov samo 5, kadar je bila vrednost GDOP visoka, na primer 5 ali več, kadar je ocena natančnosti določitve višine (1D CQ) presegala 4 cm, kadar je prišlo do spremembe v številu uporabljenih satelitov, pa tudi takrat, ko pokazatelji kakovosti določitve položaja niso presegli razumnih vrednosti. Največkrat so se grobi pogoški pojavili v primeru, ko sprejemnik GNSS dlje časa ni mogel izračunati neznanega števila celih valov. Takrat je bilo pogosto prvih nekaj fazno določenih



meritev grobo pogrešenih. Že Brown (2006) je pokazal, da v primeru, ko premični sprejemnik pri uporabi ene referenčne postaje ne more določiti fazne nedoločenosti v prvi minuti, tudi daljšanje intervala ne izboljša rezultata, saj je temu navadno vzrok velika dekorelacija prostorsko odvisnih vplivov na opazovanja GNSS, zato se uporabniku v takšnem primeru ne splača vztrajati na točki. Če pa, je priporočljivo počakati, da sprejemnik nekajkrat zapored preveri inicializacijo (pojavljanje kljukic na zaslonu terenskega kontrolerja), takšno meritev pa tudi preveriti z dvojno izmero.

Analiza rezultatov testa vpliva dolžine trajanja meritve je pokazala, da povprečje dveh nizov koordinat iste točke, ki so bile pridobljene z 10-sekundno meritvijo in 30-minutnim presledkom, zagotavlja neodvisno kontrolo in tako dviguje zaupanje v meritve, vpliva pa tudi na izboljšanje natančnosti in točnosti. Tako določene koordinate so po kakovosti primerljive s 15 minutno statično RTK izmero. Takšni praktični napotki so uveljavljeni tudi v drugih državah. Janssen (2009) na primer citira priporočila, naj se izvaja dvakrat 3-minutno opazovanje s presledkom od 20 minut do 45 minut za zmanjšanje pogreška določitve položaja, še posebno, kadar je med najbližjo referenčno postajo in premičnim sprejemnikom več kot 250 m višinske razlike.

Včasih lahko zaradi večjega števila satelitov, ki jih sledi najbližja referenčna postaja, rešitev z eno referenčno postajo tudi prekosi mrežno rešitev. To še posebej velja v omrežjih, kot je na primer SIGNAL, kjer v mrežno analizo niso vključena tudi opazovanja GLONASS, saj te signale sprejema le nekaj referenčnih postaj. Navezava na najbližjo referenčno postajo GPS+GLONASS v primeru nekaj-kilometerskega baznega vektorja zaradi sledenja vseh razpoložljivih satelitov GNSS v povprečju omogoča hitrejšo inicializacijo, večjo razpoložljivost, posledično pa tudi višjo produktivnost brez kompromisa pri natančnosti. To so pokazali tudi rezultati preizkusa produktov omrežja SIGNAL pri 5 km in 15 km dolžini baznega vektorja. Nasprotno pa pri dolžini baznega vektorja 30 km mrežne rešitve v vseh pogledih prekašajo rešitev z najbližje referenčne postaje, kar se je pokazalo tako v primerjavi proizvodov omrežja SIGNAL kot lastnega omrežja. Večji, kot so vplivi atmosfere, in daljši, kot je bazni vektor, boljši so rezultati mrežne rešitve glede na rešitev z eno referenčno postajo, so pokazali tudi Euler (2003), Brown (2006) in Geislerjeva (2006).

Prednost uporabe vseh razpoložljivih opazovanj GNSS napram uporabi samo opazovanj GPS se je pokazala po skoraj vseh kriterijih, le pri dolžini baznega vektorja 30 km se je sprejemnik, ki je uporabljal proizvod SG TRM, v povprečju inicializiral 3% hitreje (8.9 s napram 9.2 s v primeru SG GG TRM), vendar pa je bilo kar 33% več meritev grobo pogrešenih (8 meritev napram 6). Prednosti uporabe vseh razpoložljivih opazovanj GNSS, ki so bile izpostavljene v poglavju *Prednosti uporabe satelitov GLONASS*, bi bile verjetno še bolj izražene v okolju z večjo prisotnostjo ovir, na primer v urbanih okoljih, v bližini dreves, ozkih dolinah ... Dodatna opazovanja pa bi preprečila tudi situacije, ko je bilo v določenem delu dneva nad horizontom le 5 satelitov GPS. Takrat se lahko zgodi, da mrežni algoritem ne more fazno določiti celotnega omrežja, to pa posledično onemogoči uporabo mrežnih proizvodov in zmanjšuje produktivnost uporabnikov omrežja GNSS. Ta problem je lahko še posebej izražen v obdobju visoke ionosferske aktivnosti, ki bo dosegla svoj vrh v letih 2013-2014. Zato je priporočljiva nadgradnja celotnega omrežja SIGNAL, ki naj zagotavlja podporo vsem aktualnim sistemom GNSS.

V situacijah, ko omrežje ni bilo fazno določeno, individualizirani popravki po konceptih VRS in i-MAX niso bili na voljo. Programska oprema Leica GNSS Spider omenjenim situacijam učinkovito odgovarja z dvema možnostma pri nastavitvi mrežnih proizvodov ViRS in i-MAX, to je:

- možnost preklopa (ang. Fallback) na eno referenčno postajo, kadar mrežna rešitev ni dovolj dobra za določitev kakovostnih mrežnih popravkov, ter
- možnost preklopa, kadar je glavna referenčna postaja bližje premičnemu sprejemniku od nastavljene razdalje.

V prvem primeru se preklon zgodi, kadar posamezna referenčna postaja sledi vsaj 6 satelitov več kot omrežje (na primer, kadar je v omrežju fazno določenih 5 satelitov, posamezna referenčna postaja pa jih sledi vsaj 11), ali kadar omrežje ne zagotavlja mrežnih popravkov za vsaj 5 satelitov GPS (in 2 satelita GLONASS, če so v mrežno analizo vključeni vsi GNSS). Preklon se zgodi tudi v primeru, če je premični sprejemnik izven območja, ki ga pokriva omrežje. V drugem primeru pa se preklon zgodi, če je razdalja med glavno referenčno postajo in premičnim sprejemnikom krajša od nastavljene vrednosti (privzeto 3 km). Uporabnik v obeh primerih dobi sporočilo (RTCM 3 sporočilo 1029), vendar pa je njegova odgovornost, da preklopi nazaj na mrežno rešitev, ko je le-ta spet na voljo. To naredi s preprosto prekinitvijo in ponovno vzpostavitvijo povezave RTK.

Mrežni proizvod po konceptu MAC ima že po definiciji možnost določitve položaja s klasičnim postopkom obdelave opazovanj z ene (najbližje, najugodnejše) referenčne postaje. Dodatna prednost pa je, da v tem primeru sprejemnik ponovno določi položaj iz mrežnih popravkov takoj, ko so le-ti na voljo. Ta »vgrajena« lastnost koncepta MAC za uporabnika pomeni večje udobje in večjo produktivnost brez prekinitev, saj sprejemnik GNSS v vsakem trenutku določi položaj z največjo možno kakovostjo glede na razmere v omrežju.

Od vseh preizkušenih mrežnih proizvodov je v povprečju najslabše rezultate (najslabšo natančnost, največje število grobo pogrešenih meritev, največje sistematične pogreške višine) dal sprejemnik, ki je uporabljal proizvod VRS TRM omrežja SIGNAL. Dobljene natančnosti z uporabo vseh ostalih primerjanih mrežnih proizvodov obeh omrežij (MAC TRM, MAX LEI in ViRS LEI) so skoraj enake, obstajajo pa razlike v hitrosti inicializacije v korist mrežnim proizvodom lastnega omrežja, ki so še posebej izrazite pri največji oddaljenosti od najbližje postaje 30 km.

Boljše rezultate pri uporabi proizvoda ViRS LEI lastnega omrežja glede na VRS TRM omrežja SIGNAL se sicer lahko deloma pripiše problemu medopravnosti, saj premični sprejemnik enega proizvajalca ne pozna algoritmov in modelov, lastnih drugemu proizvajalcu programske opreme, ki opravlja mrežno analizo v centru omrežja in pri pripravi individualiziranih opazovanj aplicira svoje lastne modele (predvsem troposferski model). Enakemu vzroku se lahko pripiše tudi dejstvo, da je kakovost položaja pri uporabi proizvoda VRS TRM iz omrežja SIGNAL v skoraj vseh primerih slabša kot v primeru MAC TRM, saj je koncept Master-Auxiliary standardiziran, vsebina in zapis sporočil pa natančno določena in dokumentirana (RTCM 10403.1:2009), zato premični sprejemnik natančno »ve, kaj dobi«, ne glede na proizvajalca programske opreme in/ali proizvajalca premičnega sprejemnika, mrežni popravki pa vsebujejo vrednosti dejanskih in ne modeliranih vplivov na opazovanja.

Ena od omejitev koncepta VRS, ki jo je omenjal že Brown (2006), je, da premični sprejemnik zaradi načina priprave opazovanj navidezne referenčne postaje in posledično zelo kratkega baznega vektorja ne uporabi vseh informacij o omrežju ter ne modelira preostalih vplivov na opazovanja, ampak se zanese na modele, ki so vgrajeni v programsko opremo v centru omrežja (standard RTCM 3 sicer omogoča dodatno pošiljanje koordinat fizične referenčne postaje v primeru individualiziranih popravkov z ne-fizično referenčno postajo, sporočilo 1032).

Zanimiva pa je ugotovitev pri testu primerjave proizvodov lastnega omrežja, da je število neodvisnih meritev največje v primeru uporabe proizvoda ViRS LEI. Razlog je v dejstvu, da v primeru MAX premični sprejemnik opravi tudi interpolacijo vplivov na opazovanja ter izbere najprimernejšo strategijo obdelave mrežnih opazovanj, kar zahteva določen čas. V primeru individualiziranih mrežnih popravkov po konceptu i-MAX in VRS pa se interpolacija opravi na centralnem računalniku omrežja. Po drugi strani pa je isti test izpodbijal zadnje dejstvo, saj je bil povprečni čas za inicializacijo v primeru i-MAX LEI le malo krajši od časa v primeru uporabe proizvoda MAX LEI, vendar občutno daljši kot v primeru ViRS LEI. Ta rezultat je presenetil, saj niso bile pričakovane opaznejše razlike med i-MAX in ViRS. Vzrok temu ni bil odkrit. Verjetno gre za način obdelave na premičnem sprejemniku. V tem pogledu proizvod po konceptu VRS zagotavlja višjo produktivnost.

Če bi bilo sicer pričakovati boljše rezultate meritev ob uporabi proizvoda VRS TRM na premičnem sprejemniku znamke Trimble, saj je tem sprejemnikom natančno poznano celotno ozadje algoritmov in modelov programske opreme za mrežno analizo istega proizvajalca, pa so bili pričakovani bolj skladni rezultati primerjave mrežnih proizvodov MAC TRM in MAX LEI. Razlike v rezultatih so lahko posledica različnih zmoglosti osrednje programske opreme (Trimble VRS<sup>3</sup>Net in Leica GNSS Spider), da čim hitreje in tem bolj zanesljivo določi fazno nedoločenost in velikosti vplivov na opazovanja za vse referenčne postaje v omrežju GNSS. Ta pa je sicer odvisna tudi od ustreznosti nastavitve parametrov mrežne analize.

Koncept Master-Auxiliary, ki se je uveljavil kot RTCM 3.1, odstranjuje odvisnost od proizvajalca programske opreme v centru omrežja ter probleme združljivosti in medopravilnosti premičnih sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev. Odprti standard zagotavlja vsem premičnim sprejemnikom dostop do enakih podatkov omrežja ter prepušča algoritmom v sprejemnikih tudi popolno svobodo pri izbiri strategije določitve položaja. Glede na ta dejstva in rezultate opravljenih meritev se lahko oceni, da so proizvodi RTK po konceptu MAC optimalni s stališča uporabnikov premičnih sprejemnikov.

### **6.3 Ugotovitve in predlogi za upravljalce omrežij GNSS**

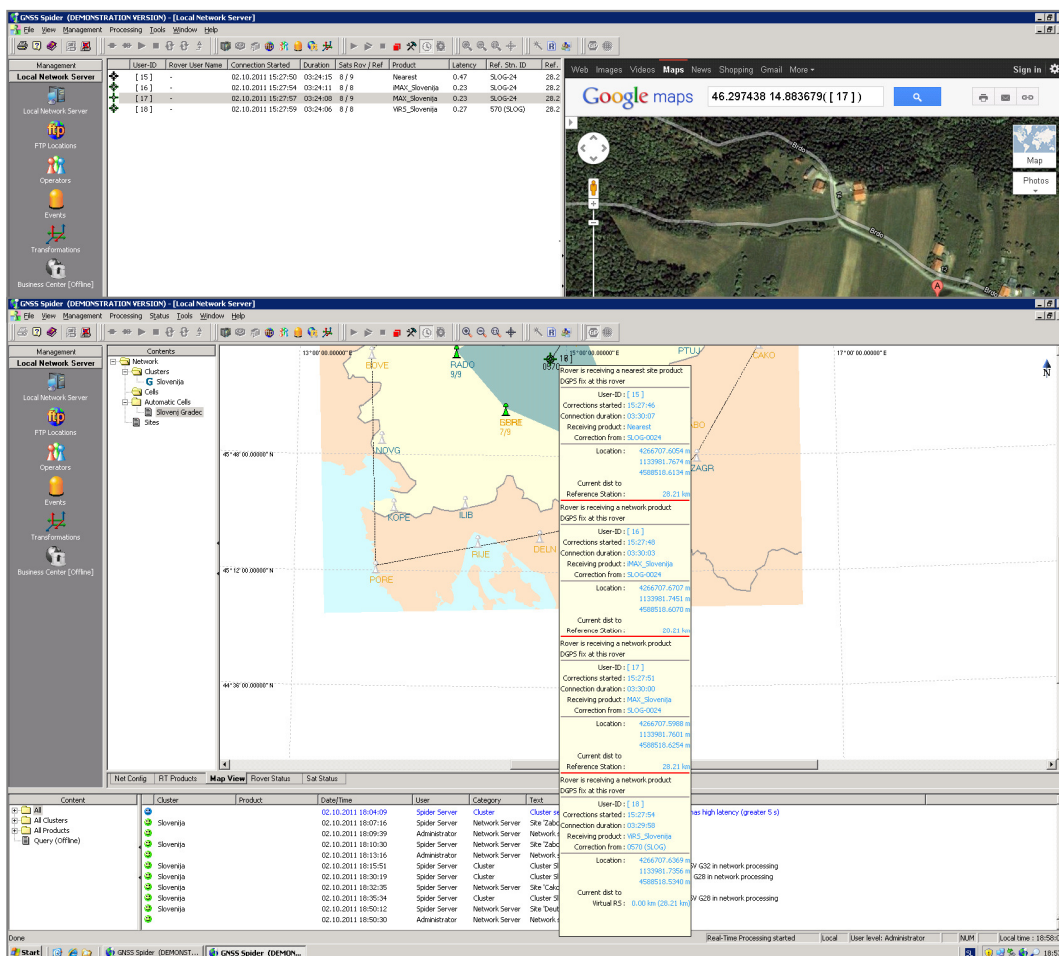
Čeprav je bilo vzpostavljeno lastno omrežje GNSS topološko enako omrežju SIGNAL, so med njima obstajale določene razlike v infrastrukturi informacijsko-komunikacijske tehnologije (IKT). Lastno omrežje je bilo vzpostavljeno v obstoječem sub-optimalnem lokalnem omrežju podjetja Geoservis, vrata v internet je predstavljala običajna optična povezava za rezidenčne uporabnike, surova opazovanja referenčnih postaj pa je dobivalo posredovane iz NTRIP Casterja omrežja SIGNAL in omrežja GNSSNet.hu in ne z aktivnim neposrednim dostopom do sprejemnikov na referenčnih postajah, kar je vse vnašalo dodatne zakasnitve v toku podatkov. Po drugi strani pa je sistem za razpošiljanje proizvodov RTK na strani omrežja SIGNAL nenavadno in nepotrebno kompleksen. Iz avtorjeve osebne korespondence s številnimi evropskimi ponudniki storitev RTK takšnega sistema ne poznajo nikjer. Ta kompleksnost verjetno tudi vnaša dodatne zakasnitve pri posredovanju popravkov RTK. Kot se je izkazalo pri terenski izmeri, pa je tudi odpravljanje komunikacijskih težav zaradi velikega števila »vpletenih« zahtevno in dolgotrajno. Ponudnik storitev RTK za razpošiljanje podatkov razen strežnika, na katerem deluje NTRIP Caster, in zanesljive internetne povezave ne potrebuje druge infrastrukture IKT. V primeru omrežja SIGNAL bi to pomenilo dvig kakovosti storitve in znižanje stroškov.

Razlog, da je takšen koncept razpošiljanja popravkov potreben zaradi podpore starejšim sprejemnikom, ki ne podpirajo paketnega dostopa do interneta in protokola NTRIP, ne zdrži resne presoje, saj na trgu obstaja več rešitev (tudi brezplačnih), ki navadno vključujejo pametni mobilni telefon z nameščenim odjemalcem NTRIP ter žično ali brezžično povezavo Bluetooth s sprejemnikom GNSS. Nesporno pa je tudi dejstvo, da so že skoraj 10 let na trgu prisotni samo še sprejemniki GNSS s standardno vgrajeno podporo protokolu NTRIP.

Pri izvedbi naloge se je večkrat pojavil problem nezanesljive komunikacije med referenčnimi postajami in mrežnim strežnikom. Pri tem gre lahko za prekinitev komunikacije in popoln izpad opazovanj ali za zamujanje toka podatkov, ki naj po navodilih proizvajalca Leica Geosystems ne bi presegl 2 s. Zakasnitve, ki jih povzroča mrežna programska oprema, so zanemarljive v primerjavi z zakasnitvami samih komunikacijskih poti ter zakasnitvami zaradi mrežne strojne opreme (požarni zidovi, usmerjevalniki). Zato je pazljiva izbira in nastavitve mrežne strojne opreme ter komunikacijskih poti do referenčnih postaj zelo pomembna. Za komunikacijo med referenčnimi postajami in centrom omrežja se v omrežju SIGNAL uporablja neprimeren dostop do interneta, namenjen rezidenčnim uporabnikom. V sodobnih omrežjih GNSS so se popolnoma uveljavila zasebna navidezna omrežja (ang. Virtual Private Network, VPN) preko IP/MPLS omrežij (ang. Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching), ki zagotavlja pasovno širino in kakovost storitve (ang. Quality of Service, QoS) primerljivo z najetimi vodi, vendar po bistveno nižji ceni vzpostavitve in mesečnih stroškov. To vrsto komunikacije poslovni uporabniki uporabljajo na primer za povezovanje dislociranih enot, ki tako delujejo v skupnem navideznem zasebnem omrežju. Takšne storitve že več let ponuja tudi Telekom Slovenije, zato bi z nadgradnjo komunikacijskih poti v omrežju SIGNAL kakovost storitev lahko enostavno dvignili na popolnoma novo raven.

Raziskava je pokazala tudi, da so bile na nekaterih referenčnih postajah nameščene zastarele različice sistemske programske opreme, na primer na sprejemnikih Leica GRX1200 različice 2.1 in 2.14, izdani maja oziroma junija 2005, v času izvedbe terenskih meritev pa je bila na voljo različica 8.20, izdana maja 2011. Vzdrževanje merske opreme je enako pomembno kot vzdrževanje druge opreme na referenčnih postajah (napajanje, rezervno napajanje, komunikacija ...) ali vzdrževanje programske opreme v centru omrežja, saj so tudi algoritmi v referenčnih sprejemnikih GNSS enakovredno podvrženi neprestanemu razvoju.

Za potrebe optimalnega delovanja omrežja so kakovostne koordinate referenčnih točk ključnega pomena. Ker se koordinate referenčnih postaj v mrežni obdelavi upoštevajo kot dane količine, vsak pogrešek vpliva na delovanje omrežja. Zaradi tega za določeno postajo na primer ni mogoče (ali pa je dolgotrajno in manj zanesljivo) določiti fazne nedoločenosti, vpliv pa se lahko prenese tudi na sosednje postaje. Za potrebe določitve položaja v državnem koordinatnem sistemu je potrebno natančno poznavanje koordinat v ETRS89 (D96). Za hitro in zanesljivo določitev vseh neznank omrežja vključno z določitvijo skupnega nivoja fazne nedoločenosti pa se zahtevajo kakovostne koordinate v aktualni različici ITRF. Po priporočilih proizvajalca programske opreme Leica Geosystems naj bi bila relativna natančnost koordinat referenčnih postaj vsaj 3 mm/100 km, absolutne koordinate pa naj bi sovpadale z ITRF koordinatami aktualne realizacije in trenutne epohe na nekaj decimetrov (Leica Geosystems, 2007b).



Slika 117: Upravljavcu omrežja GNSS so sproti na voljo obsežni podatki o uporabnikih storitev RTK. To mu omogoča tudi enostavno nudenje tehnične podpore.

Figure 117: Map view of active rovers and comprehensive rover status enables GNSS network operator to provide proper technical support to the field users.

Določitev koordinat referenčnih postaj v državnem (D96/TM) in globalnem (ITRF) koordinatnem sistemu pa ni enkratni postopek. S časom se koordinate lahko spremenijo, bodisi zaradi tektonskih premikov, seizmične aktivnosti, pogrezanja, posedanja ali plazenja zemlje, zamenjave antene GNSS ali vandalizma. Periodični preračuni koordinat referenčnih postaj (mesečni, tedenski) pa omogočajo sledenje stabilnosti referenčnih postaj, spremljanje geodinamičnega dogajanja ter realizacijo 4D koordinatnih sistemov. Nekateri proizvajalci zagotavljajo celo storitev (enkratne ali periodične) določitve koordinat referenčnih postaj. Ena takšnih je na primer Leica CrossCheck (Leica Geosystems, 2009).

Pri vzpostavitvi lastnega omrežja so bile uporabljene koordinate za 15 slovenskih in 5 avstrijskih referenčnih postaj pridobljene v mini-EUREF kampanji 2007. Za 7 hrvaških in 1 madžarsko referenčno postajo, ki so bile v omrežje SIGNAL vključene konec leta 2010, so bile koordinate ETRS89 določene s klasično lokalno izravnavo (Omrežje SIGNAL, Služba za GPS, 2011). Koordinate v sestavu ITRF2005 za te postaje so bile pridobljene z osebno korespondenco z upravljavci omrežij CROPOS in GNSSNet.hu. Za zagotovitev najbolj kakovostnih koordinat se priporoča nova skupna izravnava opazovanj vseh v omrežje SIGNAL vključenih referenčnih postaj.

V smislu topologije omrežja bi bilo smiselno v omrežju dodati 2 ali 3 referenčne postaje, na primer v Idriji in Ribnici, saj razdalje med referenčnimi postajami na teh območjih presegajo 70 km. Razdalje med posameznimi referenčnimi postajami naj sicer ne bi presegle 70 km, pri tem pa je treba zagotoviti tudi ustrezno nadštevilnost za primer izpada katere od postaj. V času povečane ionosferske aktivnosti proizvajalci programske opreme za upravljanje omrežij GNSS posebej opozarjajo, naj razdalje med referenčnimi postajami ne presegajo 50 km, saj večje razdalje negativno vplivajo na kakovost storitev RTK (Trimble Navigation, 2011).

V omrežju SIGNAL je bilo tako pri naknadni obdelavi statičnih opazovanj kot pri izmeri RTK opaziti prisotnost grobih sistematičnih pogreškov v višini. Prav tako v referenčnih podatkih niso bili navedeni pravi tipi anten in/ali sprejemnikov GNSS. Nastavitev pravih tipov in višin anten je pomembna zaradi redukcije opazovanj na referenčno točko antene, poznavanje pravega tipa referenčnih sprejemnikov GNSS pa je bistvena za ustrezno obvladovanje strojnih zakasnitev, ki jo vnaša različna frekvenca nosilnih valovanj GLONASS in je specifična za posamezne proizvajalce in tipe sprejemnikov. Brez tega pogosto opazovanj faze signalov GLONASS sploh ni mogoče fazno določiti (Al-Shaery in sod., 2012). Zato se upravljavcu priporoča pazljiva kontrola teh nastavitev.

Ker so modeli antenskih kalibracij podani v odvisnosti od višinskega in smernege kota, je treba poskrbeti za pazljivo orientiranje in horizontalno namestitev anten na referenčnih postajah, sicer se prednosti uporabe teh modelov zmanjšajo. Antene GNSS morajo biti nameščene horizontalno in orientirane proti pravemu (in ne magnetnemu) severu. Uporabljene morajo biti individualne absolutne antenske kalibracije ali vsaj kalibracije »Type Mean«, priporočljivo iz istega vira. Mrežna programska oprema vsa opazovanja GNSS popravi za absolutne vrednosti faznih centrov, ki so tako reducirana na navidezno idealno točko. V omrežjih, kjer so uporabljeni različni tipi anten različnih proizvajalcev, bi moral uporabnik imeti na svojem premičnem sprejemniku nameščene kalibracijske podatke za vse antene. Ker pa programska oprema vsa opazovanja reducira, je za vse mrežne proizvode RTK priporočljiva vključitev ničelne antene. Za proizvode RTK posameznih referenčnih postaj je izbira v primeru Leica GNSS Spider sicer opcijaska, vendar se uporaba ničelne antene priporoča tudi v tem primeru. Zato bo uporabnik storitev RTK vedno sprejemal enake podatke iz omrežja, ne glede na to, katera antena je dejansko uporabljena na konkretni referenčni postaji. Na premičnem sprejemniku mora namestiti samo podatke o relativni kalibraciji ničelne antene GPPNULLANTENNA. To za uporabnika pomeni tako poenostavitev dela kot odstranitev potencialnih grobih pogreškov zaradi uporabe napačnih podatkov o antenah.

Ugotovljena je bila tudi preko 2.5-krat višja količina prenesenih popravkov v primeru MAC TRM iz omrežja SIGNAL glede na storitev MAX LEI iz lastnega omrežja. Ker potrebna pasovna širina predstavlja strošek tako za upravljavca omrežja GNSS kot za uporabnike storitev, se priporoča pregled parametrov mrežne analize (vključena opazovanja GLONASS, višinski kot satelitov ...) ter parametrov pošiljanja popravkov RTK (interval pošiljanja razlik popravkov ...).

#### **6.4 Predlogi in možnosti za nadaljnje raziskave**

Že med samo terensko izmero, še več pa pri analiziranju rezultatov, so se pojavile nove ideje za nove teste, ki bi bili še bolj reprezentativni. Tako bi bilo predvsem pri največji oddaljenosti od najbližje referenčne postaje zanimivo preizkusiti obnašanje sprejemnikov z različnimi proizvodi RTK v zahtevnejših razmerah, na primer v bližini ovir. Zanimivo bi bilo primerjati rezultate 15-minutne

meritve RTK z rezultati naknadne obdelave 15-minutnih statičnih opazovanj ter raziskati vplive različne nadmorske višine premičnega sprejemnika pri uporabi različnim mrežnih proizvodov RTK.

Vsi omenjeni testi bi se lahko opravili še s sprejemniki GNSS drugih proizvajalcev ter preverila medopravilnost, vendar pa je bil namen naloge preveriti zmogljivosti različnih proizvodov RTK, ki jih omogoča omrežje, ne pa preizkus zmogljivosti sprejemnikov. Čeprav bi kdo morda trdil, da rezultati dokazujejo samo to, da je Leicin sprejemnik GNSS optimalno prilagojen za delo v omrežju, ki ga upravlja Leicina programska oprema, pa je preizkus proizvodov RTK po konceptu MAC nedvomno dokazal prednosti lastnega omrežja, kljub temu, da je bilo v vseh pogledih podrejeno ter vzpostavljeno v sub-optimalnem okolju IKT.

Veliko podatkov pa se še vedno skriva tudi v gigabajtih meritev in opazovanj, ki so bila zajeta v sklopu magistrskega dela – od surovih opazovanj vseh referenčnih postaj omrežja, zapisniških datotek mrežnega algoritma, surovih opazovanj premičnih sprejemnikov, do referenčnih podatkov, ki so jih sprejemali, in se jih lahko dekodira iz zapisa LB2.

## 7 VIRI

Al-Shaery, A., Zhang, S. Rizos, C. 2013. An enhanced calibration method of GLONASS inter-channel bias for GNSS RTK. *GPS Solutions*, 17, 2: 165-173.

Alves, P., Geisler, I., Brown, N., Wirth, J., Euler, H.-J. 2005. Introduction of a Geometry-Based Network RTK Quality Indicator. V: *Proceedings of ION GNSS 2005*. Long Beach, California, 13.-16. september 2005. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 2552-2563.

Bačić, Ž. 2009. *CROPOS Users' Manuals*, Zagreb, Državna geodetska uprava: 60 str.  
[http://www.cropos.hr/files/pdf/cropos\\_users-manual.pdf](http://www.cropos.hr/files/pdf/cropos_users-manual.pdf) (Pridobljeno 11.08.2010)

Blau, P. 2012. GPS IIF3 in Orbit – despite suspected Problems with Delta IV.  
<http://www.spaceflight101.com/delta-iv-gps-iif-3-launch-updates.html> (Pridobljeno 26.02.2013)

Blewitt, G. 1997. *Basics of the GPS Technique: Observation Equations*. V: Johnson, B. (ur.). *Geodetic Applications of GPS*. Gävle, Švedska, Lantmäteriet: str. 10-54.

Blume, F., Berglund, H., Estey, L. 2012. The Effect of L2C Signal Tracking on High-Precision Carrier Phase GPS Positioning. *USGS Geodesy Workshop*, San Francisco, California, 18.-19. oktober 2012 : 23 str.

Boeing. *Global Positioning System (GPS) IIF*.  
<http://www.boeing.com/defense-space/space/gps/index.html> (Pridobljeno 10.04.2011)

Bogatin, S., Kogoj, D. 2006. Uporaba Kalmanovega filtra v terestrični geodeziji. *Geodetski vestnik*, 50, 2: 211-223.

Brown, N., Alves, P. 2008. New Method for Graphically Representing Residual Error in an RTK. V: *International Symposium on GPS/GNSS*. Tokyo, Japonska, 11.-14. november 2008. Tokyo, Japonska, Japan Institute of Navigation: 7 str.

Brown, N., Geisler, I., Troyer, L. 2006. RTK Rover Performance using the Master-Auxiliary Concept. *Journal of Global Positioning Systems*, 5, 1-2: 135-144.

Brown, N., Keenan, R., Richter, B., Troyer, L. 2005. Advances in Ambiguity Resolution for RTK Applications Using the New RTCM v3.0 Master-Auxiliary Messages. V: *Proceedings of ION GNSS 2005*. Long Beach, California, 13.-16. september 2005. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 73-80.

de Jonge, P., Tiberius, C. 1996. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. *Delft University of Tehcnology, Geodetic Computing Centre, LGR Series*, 12: 49 str.

EPN Central Bureau. 2013. *Station List*.  
Available at: [http://www.epncb.oma.be/\\_networkdata/stationlist.php](http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php) (Pridobljeno 09.11.2013)

Euler, H.-J. 2006. GNSS Solutions: A new version of the RTCM SC-104 standard, the probability of solving integer ambiguities. *insideGNSS*, 1, 7: 20-25.



Euler, H.-J., Keenan, R., Zebhauser, B., Wübbena, G. 2001. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. V: Proceedings of ION GPS 2001. Salt Lake City, Utah, 11.-14. september 2001. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 379-391.

Euler, H.-J., Keenan, R., Zebhauser, B., Wübbena, G. 2002. Reference Station Network: A Conceptual Study Using Their Information With the Current and Next Generation of RTCM Messages. V: Proceedings of ENC-GNSS 2002. Copenhagen, Danska, 27.-30. maj 2002. Antwerp, Belgija, European Group of Institutes of Navigation: 13 str.

Euler, H.-J., Seeger, S., Takac, F. 2004. Analysis of Biases Influencing Successful Rover Positioning with GNSS-Network RTK. Journal of Global Positioning Systems, 3, 1-2: 70-78.

Euler, H.-J., Seeger, S., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B. E. 2004. Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages. V: Proceedings of ION NTM 2004. San Diego, California, 26.-28. januar 2004. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 453-461.

Euler, H.-J., Zebhauser, B. 2003. The Use of Standardized Network RTK Messages in Rover Applications for Surveying. V: Proceedings of ION NTM 2003. Anaheim, California, 22.-24. januar 2003. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 377-384.

Euler, H.-J., Zelzer, O., Takac, O., Zebhauser, B. 2003. Applicability of Standardized Network RTK Message for Surveying Rovers. V: Proceedings of ION GPS/GNSS 2003. Portland, Oregon, 9.-12. september 2003. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 1361-1369.

Ezilon Inc., Physical Map of Slovenia.

<http://www.ezilon.com/maps/europe/slovenia-physical-maps.html> (Pridobljeno 29.12.2012)

Geisler, I. 2006. Performance Improvements of Network RTK Positioning. V: Proceedings of ION NTM 2006. Monterey, California, 18.-20. januar 2006. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 869-880.

Heo, Y., Yan, T., Lim, S., Rizos, C. 2009. International Standard GNSS Real-Time Data Formats and Protocols. V: Proceedings of IGSS Symposium 2009. Queensland, Avstralija, 1.-3. december 2009. Tweed Heads, Avstralija, IGSS Society Inc: 17 str.

Janssen, V. 2009. A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK. V: Proceedings of IGSS Symposium 2009. Queensland, Avstralija, 1.-3. december 2009. Tweed Heads, Avstralija, IGSS Society Inc: 13 str.

Joosten, P., Tiberius, C. 2000. Fixing the ambiguities – are you sure they're right?. GPS World, 11, 5: 46-51.

Joosten, P., Tiberius, C. 2002. LAMBDA: FAQs. GPS Solutions, 6, 2: 109-114.

Köhne, A., Wößner, M. 2009. GPS Explained.

<http://www.kowoma.de/en/gps/errors.htm> (Pridobljeno 04.11.2012)

Kozmus, K., Stopar, B. 2006. Protokol NTRIP za prenos podatkov GNSS preko interneta. Geodetski vestnik, 50, 3: 461-471.

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. Geodetski vestnik, 47, 4: 404-413.

Lachapelle, G., Petovello, M. 2006. GNSS Solutions: Precise Point Positioning and Its Challenges. insideGNSS, 1, 8: 16-21.

RICS. 2010. Guidelines for the Use of GNSS in Land Surveying and Mapping, 2nd Edition. Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), Coventry, UK: 82 str.

Landau, H., Vollath, U., Chen, X. 2003. Virtual Reference Station versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations. V: Proceedings of ENC-GNSS 2003, Graz, Avstrija, 22.-25. april 2003. Antwerp, Belgija, European Group of Institutes of Navigation: 15 str.

Leica Geosystems, 2005. Networked Reference Stations – Take it to the MAX. White Paper. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 12 str.

Leica Geosystems, 2006. Using GPS Spider v2.2 RT-Products with Null Antenna. NRS Newsletter 01/2006. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 3 str.

Leica Geosystems, 2007. GPS Spider IT and Security. A guide to communication technology and security for GPS Spider administrators and IT specialists. White Paper. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 15 str.

Leica Geosystems, 2007a. RTK Networks – An introduction. System 1200 Newsletter – No. 52. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 5 str.

Leica Geosystems, 2007b. Using GLONASS with Leica GNSS Spider v3.0. NRS Newsletter 02/2007. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 5 str.

Leica Geosystems, 2008. Leica GPS1200+ Series Technical Data, Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 16 str.

Leica Geosystems, 2008a. RTK Networks – A Case Study. System 1200 Newsletter – No. 54. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 6 str.

Leica Geosystems, 2008b. RTK Networks – Different Methods. System 1200 Newsletter – No. 53. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 6 str.

Leica Geosystems, 2009. Leica CrossCheck. GNSS Reference Station Integrity Monitoring. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 2 str.

Leica Geosystems, 2009a. New Leica GNSS Spider v3.2 GLONASS Processing. NRS Newsletter 01/2009. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 5 str.

Leica Geosystems, 2010. Antenna Calibrations. For Your Reference 02. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 5 str.

Leica Geosystems, 2010a. Leica SpiderQC. GNSS Network Quality Control. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 2 str.

Leica Geosystems, 2010b. Leica SpiderWeb. Value Added Web Services for GNSS Networks. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 2 str.

Leica Geosystems, 2010c. Understanding automated RT products. For Your Reference 03. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 8 str.

Leica Geosystems, 2011. Leica GNSS Spider Installation Guide. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 89 str.

Leica Geosystems, 2011a. Leica GNSS Spider: What's New! – Release v4.2.0. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 78 str.

Leica Geosystems, 2012. Leica SpiderQC: What's New! – Release v4.2. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 13 str.

Leick, A. 2004. GPS Satellite Surveying, 3rd Edition. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons: 435 str.

Lin, M. 2006. RTCM 3.0 Implementation in Network RTK and Performance Analysis. Master Thesis. Alberta, Canada. Schulich School of Engineering, University of Calgary (samozaložba M. Lin): 140 str.

Mader, G. L., Weston, N. D. 2008. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. V: Proceedings of FIG Working Week. Stockholm, Švedska, 14.-19. junij 2008. Copenhagen, Danska, International Federation of Surveyors: 21 str.

Mozetič, B. 2006. Državni koordinatni sistem. Izobraževanje za imetnike geodetskih izkaznic : Učno gradivo. Ljubljana. Izobraževalno središče za geomatiko, november 2006: 28 str.

Mozetič, B., Komadina, Ž., Radovan, D., Berk, S., Meser, N., Klanjšček, M., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Kozmus, K. 2006. Navodila za izvajanje izmere z uporabo globalnih navigacijskih satelitskih sistemov v državnem koordinatnem sistemu. Različica 2.0, 20.11.2006. Ljubljana. Geodetska uprava R Slovenije: 35 strani.

Omrežje SIGNAL, Služba za GPS. 2007. Izračun koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL – uskladitev s slovenskim geodetskim datumom D96. Ljubljana. Geodetski inštitut Slovenije: 5 str.

Omrežje SIGNAL, Služba za GPS. 2011. Izračun koordinat stalnih postaj sosednjih omrežij, vključenih v omrežje SIGNAL – uskladitev s slovenskim geodetskim datumom D96. Ljubljana. Geodetski inštitut Slovenije: 2 str.

Ordnance Survey, OS Net. GNSS.

<http://www.ordnancesurvey.co.uk/business-and-government/help-and-support/navigation-technology/os-net/gnss-positioning-services.html#faq20> (Pridobljeno 27.08.2013)

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2004. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov oddanih efemerid. Geodetski vestnik, 48, 2: 151-166.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2005. Določitev absolutnega položaja GPS-sprejemnika iz kodnih opazovanj. Geodetski vestnik, 49, 3: 373-394.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2005. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov preciznih efemerid. Geodetski vestnik, 49, 2: 177-190.

Perkins, B. 2010. Have you mapped your data today?.

[http://www.computerworld.com/s/article/350588/Have\\_You\\_Mapped\\_Your\\_Data\\_Today\\_](http://www.computerworld.com/s/article/350588/Have_You_Mapped_Your_Data_Today_)  
(Pridobljeno 11.04. 2011)

Petovello, M., Lachapelle, G. 2007. What is carried phase wind up?. insideGNSS, 2, 5: 26-35.

RTCM 10402.3:2010. Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 2.3. Alexandria, Virginia. Radio Technical Commission For Maritime Services.

RTCM 10403.1:2009. Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3. Arlington, Virginia. Radio Technical Commission for Maritime Services.

RTCM. RTCM Overview.

<http://www.rtc.org/overview.php> (Pridobljeno 03.11.2012)

Sabatini, R., Palmerini, G. 2008. Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing. Neuilly-sur-Seine Cedex, France. Research and Technology Organisation, NATO: 182 str.

Stopar, B. 2010. Koordinatni sistemi in transformacije koordinatnih sistemov v geodeziji. Obvezno izobraževanje geodetov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 62 str.

Stopar, B., Kuhar, M. 2001. Moderni geodetski koordinatni sistemi in astrogeodetska mreža Slovenije. Geodetski vestnik, 45, 1 in 2: 11-26.

Takac, F., Hilker, C., Kotthof, H., Richter, B. 2005. Combining Measurements from Multiple Global Navigation Satellite Systems for RTK Applications. V: International Symposium on GPS/GNSS, Hong Kong, 8.-10. December 2005: 7 str.

Takac, F., Lienhart, W. 2008. SmartRTK: A Novel Method Of Processing Standardised RTCM Network RTK Information For High Precision Positioning. V: ENC-GNSS 2008, Toulouse, Francija, 22.-25. April 2008. Antwerp, Belgija, European Group of Institutes of Navigation: 9 str.

Takac, F., Walford, J. 2006. Leica System 1200 – High Performance GNSS Technology for RTK Applications. V: ION GNSS 2005, Fort Worth, Texas, 26.-29. September 2006. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 9 str.

Takac, F., Zelzer, O. 2008. The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX. V: Proceedings of ION GNSS 2008, Savannah, GA, 16.-19. September 2008. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 8 str.

Telekom Slovenije d.d. Paket Telemetrija.

<http://www.mobitel.si/paketi/paket-telemetrija.aspx> (Pridobljeno 25.07.2013)

Teunissen, P., de Jonge, P., Tiberius, C. 1996. The LAMBDA Method for Fast GPS Surveying. V: Proceedings of International Symposium 'GPS technology applications', Bukarešta, Romunija, 26.-29. september: 8 str.

Trimble Navigation. 2011. Infrastructure Customer FAQ 18049. Dayton, ZDA.  
[http://www.trimble.com/infrastructure/pdf/FAQ\\_Infrastructure\\_VRS3NetApp\\_18049.pdf](http://www.trimble.com/infrastructure/pdf/FAQ_Infrastructure_VRS3NetApp_18049.pdf)  
(Pridobljeno 01.06.2013)

Trimble Terrasat. 2005. Support of Network Formats by Trimble GPSNet Network RTK Solution. White Paper. Höchenkirchen, Nemčija, Trimble Navigation Limited: 8 str.

Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Wagner, B. 2000. Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. V: Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, 19.-22. September 2000. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 9 str.

Vollath, U., Landau, H., Chen, X. 2002. Network RTK – Concept and Performance. V: GNSS Symposium 2002, Wuhan, Kitajska, 6.-8. november 2002. Wuhan, Kitajska, CPGPS: 8 str.

Wade, M., GPS Block 2F.  
<http://www.astronautix.com/craft/gpssock2f.htm> (Pridobljeno 10.04.2011)

Walford, J. 2012. Leica GNSS Reference Antennas. White Paper. Heerbrugg, Švica, Leica Geosystems AG: 11 str.

Wanninger, L. 2008. Introduction to Network RTK.  
<http://www.wasoft.de/e/iagwg451/index.html> (Pridobljeno 07.06.2010)

Wanninger, L. 2011. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. J Geod, 86, 2: 10 str.

Welch, G., Bishop, G. 2006. An Introduction to the Kalman Filter. Chapel Hill, North Carolina, University of North Carolina: 16 str.

Wikipedia skupnost. Circular polarization.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_polarization](http://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization) (Pridobljeno 09.01.2013)

Wübbena, G. 1996. A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. V: ION GPS 1996: Kansas City, Missouri, 17.-20. september 1996. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 8 str.

Wübbena, G. 2008. GNSS Network-RTK Today and in the Future Concepts and RTCM Standards. V: International Symposium on GNSS: Berlin, Nemčija, 11.-14. november 2008. Berlin, Nemčija, EUPOS: 51 str.

Wübbena, G., Bagge, A. 2006. RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP. Geo++ White Paper 2006.01. Garbsen, Nemčija. Geo++ GmbH: 8 str.

Wübbena, G., Bagge, A., Schmitz, M. 2001a. RTK Networks based on Geo++ GNSMART – Concept, Implementation, Results. V: Proceedings of ION GPS 2001: Salt Lake City, Utah, 11.-14. september 2001. Manassas, Virginia, The Institute of Navigation: 11 str.

Wübbena, G., Bagge, A., Schmitz, M. 2001. Network-Based Techniques for RTK Applications. V: GPS Symposium JIN 2001: Tokio, Japonska, 14.-16. november 2001. Tokio, Japonska, Japan Institute of Navigation: 14 str.

Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A. 2006. Real-Time GNSS Data Transmission Standard RTCM 3.0. V: Proceedings of IGS Workshop 2006. Darmstadt, Germany, 8.-12. maj 2006. Pasadena, California, International GNSS Service: 26 str.