

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



SIMON ŠANCA

**KINEMATIČNA METODA PPP
(PRECISE POINT POSITIONING) DOLOČITVE
POLOŽAJA V GNSS**

DIPLOMSKA NALOGA

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA**

Ljubljana, 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA

Kandidat/-ka:

SIMON ŠANCA

**KINEMATIČNA METODA PPP
(PRECISE POINT POSITIONING) DOLOČITVE
POLOŽAJA V GNSS**

KINEMATIC PPP (PRECISE POINT POSITIONING) IN GNSS

Mentor/-ica:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor/-ica:

asist. dr. Oskar Sterle

Član komisije:

Predsednik komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 528.531:004.774(043.2)
Avtor: Simon Šanca
Mentor: prof. dr. Bojan Stopar
Somentor: asist. dr. Oskar Sterle
Naslov: Kinematična metoda PPP (Precise Point Positioning) določitve položaja v GNSS
Tip dokumenta: diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema: 57 str., 30 sl., 7 pregl., 14 en.
Ključne besede: GPS, GLONASS, Precise Point Positioning (PPP), kinematična izmera, spletne storitve PPP, gLAB, RTKLIB

Izvleček

V diplomski nalogi je obravnavana kinematična metoda PPP (Precise Point Positioning). Predstavljeni so osnovni teoretični koncepti in prednosti ter slabosti metode. Predstavljena je programska oprema, ki omogoča obdelavo opazovanj z metodo PPP. Za namen raziskave smo izvedli statična in kinematična opazovanja GPS in GLONASS. Kinematične meritve z GNSS smo spremljali s tahimetrom ter tako pridobili referenčne koordinate za oceno kakovosti koordinat določenih z metodo PPP. Opazovanja GNSS smo obdelali s spletnimi storitvami PPP, ki so na voljo brezplačno. Uporabili smo štiri spletne storitve: APPS, CSRS-PPP, GAPS in magicGNSS ter dva samostojna programa gLAB in RTKLIB. Za analizo kakovosti kinematičnih meritev z metodo PPP smo izdelali lastno programsko rešitev. Rezultate analize smo statistično ovrednotili ter ocenili kakovost in uporabnost kinematične metode PPP.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.531:004.774(043.2)
Author: Simon Šanca
Supervisor: prof. dr. Bojan Stopar, PhD
Cosupervisor: asist. dr. Oskar Sterle, PhD
Title: Kinematic PPP (Precise Point Positioning) in GNSS
Document type: Graduation Thesis - University Studies
Notes: 57 p., 30 fig., 7 tab., 14 eq.
Key words: GPS, GLONASS, Precise Point Positioning (PPP),
kinematic observations, PPP Online Services, gLAB, RTKLIB

Abstract

The thesis addresses the kinematic PPP (Precise Point Positioning). It presents the theoretical concepts of this method and its pros and cons. Moreover, the software used for processing the observations with the PPP is presented. For the purpose of this research GPS and GLONASS observations were taken in static and kinematic mode. Kinematic observations were taken with GNSS in PPP mode and at the same time tachymetric measurements were conducted. GNSS observations were processed using PPP software, available online and free of charge. Four different online services were used: APPS, CSRS-PPP, GAPS, magicGNSS and two standalone applications gLAB and RTKLIB. For the analysis of the kinematic PPP an own software solution was created. Statistical analysis was conducted to assess the quality and the usefulness of the kinematic PPP.

ZAHVALA

Mentorju prof. dr. Bojanu Stoparju in somentorju asist. dr. Oskarju Sterletu se zahvaljujem za prijazne nasvete, strokovno vodenje in pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi g. Albinu Mencinu za pomoč pri izvedbi terenskih meritev.

Posebna zahvala gre tudi vsem domačim, ker ste mi v prvi vrsti omogočili študij in me vedno podpirali in spodbujali pri učenju.

V veliko pomoč ste mi bili tudi sošolci in prijatelji, ki ste mi študentska leta obdali s smehom in dobro voljo.

VSEBINA

Uporabljene kratice in okrajšave	X
1 UVOD	1
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1 Metoda Precise Point Positioning (PPP)	3
2.2 Izračun položaja sprejemnika z metodo PPP	4
2.3 Prednosti in slabosti metode PPP	5
2.4 Vplivi na opazovanja	6
3 PREDSTAVITEV PROGRAMSKE OPREME PPP	10
3.1 CSRS-PPP	11
3.2 GAPS	13
3.3 APPS	14
3.4 MagicGNSS	17
3.5 GLAB	18
3.6 RTKLIB	21
4 RAZISKAVA	23
4.1 Merski instrumentarij	23
4.2 Delovišče	24
4.3 Načrt izvedbe meritev	25
4.4 Izvedba meritev z GNSS in kontrolnih tahimetričnih meritev	25
5 REZULTATI OBDELAVE IN ANALIZE MERITEV	27
5.1 Rezultati obdelave meritev s programsko opremo PPP	27
5.2 Določitev referenčnih koordinat s tahimetrom	30
5.3 Primerjava koordinat določenih s PPP GNSS in tahimetrije	31
5.3.1 Primerjava horizontalnih koordinat	33
5.3.2 Primerjava višin	40
5.4 Analiza kinematične metode PPP	46
6 ANALIZA	51
6.1 Analiza rezultatov obdelave s programsko opremo PPP	51
6.2 Analiza kinematične metode PPP	53
7 ZAKLJUČEK	54
VIRI	55

KAZALO SLIK

1	Princip določanja absolutnega položaja z GNSS	3
2	Plasti Zemljine atmosfere	7
3	Spletna storitev CSRS-PPP	11
4	Spletna storitev GAPS	13
5	Spletna storitev APPS	15
6	Spletna storitev magicGNSS	17
7	Program gLAB	18
8	Programski paket RTKLIB	21
9	Merski instrumentarij	23
10	Postavitev elektronskega tahimetra Leica TCRP1201+ na stebru FGG1	24
11	Postavitev GNSS sprejemnika s 360°prizmo na stebru FGG2	24
12	Skica izmere	25
13	Izmera pod streho	26
14	Položaji CSRS-PPP	29
15	Položaji APPS	29
16	Položaji gLAB	30
17	Točke izmerjene s tahimetrom	31
18	Skica primerjave položajev GNSS in tahimetra	33
19	Primerjava horizontalnih položajev s programom	34
20	Odstopanja horizontalnih položajev CSRS-PPP po serijah izmere	35
21	Odstopanja horizontalnih položajev APPS po serijah izmere	36
22	Odstopanja horizontalnih položajev magicGNSS po serijah izmere	37
23	Odstopanja horizontalnih položajev gLAB po serijah izmere	38
24	Odstopanja horizontalnih položajev RTKLIB po serijah izmere	39
25	Primerjava višin s programom	41
26	Odstopanja višin APPS po serijah izmere	41
27	Odstopanja višin CSRS-PPP po serijah izmere	42
28	Odstopanja višin magicGNSS po serijah izmere	43
29	Odstopanja višin gLAB po serijah izmere	44
30	Odstopanja višin RTKLIB po serijah izmere	45

KAZALO PREGLEDNIC

1	Koordinate stebrov v državnem koordinatnem sistemu D96/TM s pripadajočimi ortometričnimi in elipsoidnimi višinami	24
2	Koordinate merjenih stebrov s statično metodo PPP v državnem koordinatnem sistemu D96/TM z ortometričnimi in elipsoidnimi višinami	28
3	Rezultati statistične analize CSRS-PPP	47
4	Rezultati statistične analize APPS	48
5	Rezultati statistične analize magicGNSS	48
6	Rezultati statistične analize gLAB	49
7	Rezultati statistične analize RTKLIB	50

UPORABLJENE KRATICE IN OKRAJŠAVE

AIUB	angl. Astronomical Institute of the University of Bern
ANTEX	angl. The Antenna Exchange Format
APC	angl. Antenna Phase Center (fazni center antene)
APPS	angl. Automatic Precise Point Positioning
ARP	angl. Antenna Reference Point (referenčna točka antene)
AUSPOS	angl. Australian Positioning Service
CSRS	angl. Canadian Spatial Reference System
DAC	angl. Data Analysis Core
DCB	angl. Differential Code Biases
DOP	angl. Dillution of Precision
DPC	angl. Data Processing Core
D96/TM	Datum 1996/Transverzalna Merkatorjeva projekcija
ECEF	angl. Earth Centered Earth Fixed
ESA	angl. European Space Agency
FTP	angl. File Transfer Protocol
GAGAN	angl. GPS Aided Geo Augmented Navigation System
GAPS	angl. GNSS Analysis and Positioning Software
GDGPS	angl. Global Differential GPS
GIO	angl. Global Ionosphere Maps
gLAB	angl. GNSS-Lab Tool
GLONASS	rus. GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	angl. Global Positioning System
GRS80	angl. Geodetic Reference System 1980
GUI	angl. Grafical User Interface
IGS	angl. International GNSS Service
ipd.	in podobno
IRNSS	angl. Indian Regional Navigation Satellite System
ITRF	angl. International Terrestrial Reference Frame
JPL	angl. Jet Propulsion Laboratory
NAD83	angl. North American Datum 1983
NASA	angl. National Aeronautics and Space Administration
NEU	angl. North-East-Up
NMEA0183	kratica za standardizirana elektronska sporočila
NOAA	angl. National Oceanic and Atmospheric Administration
NTRIP	angl. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OPUS	angl. Online Positioning User Service
oz.	oziroma
PPP	angl. Precise Point Positioning
PVT	angl. Position-Velocity-Time
QZSS	angl. Quasi-Zenith Satellite System
RINEX	angl. Receiver Independent Exchange Format
RTCM	angl. Radio Technical Commission for Maritime Services
SIGNAL	SLovenija-Geodezija-NAvigacija-Lokacija
SCOUT	angl. Scripps Coordinate Update Tool
TEC	angl. Total Electron Content
URL	angl. Uniform Resource Locator
WGS84	World Geodetic System 1984

1 UVOD

Geodezija je veda, ki se ukvarja z merjenjem in predstavitvijo Zemlje, vključno z njenim gravitacijskim poljem. Osnovna naloga geodezije je določitev položajev oz. koordinat točk na izbran (dogovorjen) koordinatni sistem. Položaji novih točk se določajo na podlagi opazovanj med danimi in novimi točkami (Sterle, 2007). Z razvojem tehnologije so se sočasno razvijale nove metode geodetske izmere, ki so z večjo natančnostjo merjenih količin prispevale k boljši končni natančnosti merjenih koordinat. Z izstrelitvijo prvega umetnega Zemljinega satelita Sputnik 1 leta 1957, se je začel razvoj satelitske geodezije, ki se je uspešno razvila v samostojno področje znotraj geodezije. Tekmovalnost med ZDA in Sovjetsko zvezo je v obdobju hladne vojne dodatno prispevala k hitrejšemu napredku vesoljske tehnologije, ki je z večanjem števila satelitov omogočala natančnejšo določevanje položaja na Zemlji. Leta 1979 so izstrelili prvi satelit iz sistema NAVSTAR GPS, ki je leta 1983 postal odprt za civilno uporabo. Ruski odgovor ameriškemu sistemu je bil sistem GLONASS leta 1988. Civilna uporaba sistema GPS je sprožila novo revolucijo na področju geodezije. S pojavom prvih komercialnih GNSS sprejemnikov v 80-ih letih so se satelitske metode izmere vse pogosteje uporabljale v praksi, saj so prispevale k povečani natančnosti in točnosti opazovanj. Za geodezijo je to pomenilo pojav satelitsko podprte geodetske izmere (Stopar, 2016).

Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS) označujejo skupek vseh trenutno delujočih satelitskih sistemov, ki skupaj oblikujejo celoto. To so ameriški NAVSTAR GPS, ruski GLONASS, evropski Galileo, kitajski BeiDou, indijski GAGAN in IRNSS ter japonski QZZR. Vsak sistem ima značilno tridelno segmentno zgradbo (Vok, 2015). Vesoljski segment označuje okoli Zemlje krožeče satelite, kontrolni segment sestavljajo kontrolne postaje na površju Zemlje, ki spremljajo delovanje satelitov in računajo njihove položaje, ki jih posredujejo uporabniku. Uporabniški segment tvorijo vsi uporabniki GNSS storitev, ki potrebujejo lokacijske podatke.

V času pisanja diplomske naloge kroži okoli Zemlje 1459 delujočih satelitov, od tega jih je 139 namenjenih za navigacijo in za globalno določanje položaja (UCS, 2017). Veliko število satelitov omogoča natančno določitev položaja na Zemlji, ki je odvisna od več dejavnikov. Od uporabljene metode izmere, od načina obdelave in trajanja opazovanj ter od uporabljene programske opreme za obdelavo opazovanj (Čadež, 2010).

Metode geodetske GNSS-izmere v splošnem delimo na dva dela, na relativno določanje položaja in na absolutno določanje položaja. Skupno vsem relativnim metodam je to, da sta za pridobitev položaja s centimetrsko natančnostjo potrebna najmanj dva sprejemnika, ki hkrati sprejemata signale istih satelitov. Z istočasnim sprejemanjem signala na dveh sprejemnikih in s sestavljanjem faznih razlik se številni pogreški odstranijo (pogrešek ure satelitov in sprejemnika) ali zmanjšajo na minimum (vpliv ionosfere, troposfere, pogreška položajev satelitov itd.) (Leick, 1995). Za relativno GNSS-izmero se danes uporablja več metod, ki jih delimo glede na lego sprejemnika med izmero in na način obdelave opazovanj. Ločimo med statično in kinematično izmero ter med izmero v realnem času in med izmero z naknadno obdelavo opazovanj.

Absolutne metode izmere temeljijo na neposredni določitvi razdalje od satelita do sprejemnika, ki jo v satelitski geodeziji imenujemo psevdorazdalja. Psevdorazdalja ni prava razdalja, ker je podvržena določenim vplivom. Bistvo vsem absolutnim metodam je neposredna določitev položaja na osnovi psevdorazdalj v globalnem koordinatnem sistemu in neodvisnost od omrežja stalnih postaj.

Konec devetdesetih let prejšnjega stoletja se je pojavila nova GNSS metoda določitve položaja, ki so jo poimenovali metoda Precise Point Positioning (PPP). Z metodo PPP so odpravili potrebo po tvorjenju faznih razlik. Bistvo metode je v tem, da za izmero ni potrebnih več sprejemnikov, ampak zadostuje le en sam, ki je popolnoma neodvisen od omrežja stalnih postaj, kot je npr. omrežje SIGNAL v Republiki Sloveniji. Metoda PPP uporablja natančne efemeride satelitov,

modele teka ur satelitov, modele ionosfere in troposfere. Z večurnimi statičnimi opazovanji je možno doseči natančnost pod centimetrom (Sterle in sod., 2014). Prav tako je metodo možno uporabiti v statičnem in kinematičnem načinu. Slednji način je manj raziskan in uporabljen, zato je naša glavna motivacija za pisanje diplomske naloge prav kinematična metoda PPP. Na spletu so na voljo različni programi, ki omogočajo naknadno obdelavo opazovanj z uporabo metode PPP v kinematičnem načinu. Večina programov je na voljo brezplačno, nekateri so plačljivi. Naš glavni namen je preizkus brezplačnih programov za obdelavo lastnih opazovanj.

V diplomski nalogi smo raziskovali kinematično metodo PPP. Zanimala nas je predvsem programska oprema, ki je na voljo in omogoča obdelavo opazovanj, kakovost obdelave opazovanj in končni rezultati obdelave opazovanj. Za namen raziskave smo izvedli štiri serije statičnih opazovanj in štiri serije kinematičnih opazovanj, kjer je vsaki statični izmeri sledila ena serija kinematične izmere GNSS. Vsako serijo kinematične določitve koordinat smo spremljali s sistemom Leica Viva SmartPole, ki omogoča beleženje koordinat 360° prizme. S tahimetrično izmero smo pridobili referenčne koordinate za primerjavo koordinat, določenih z GNSS. Opazovanja GNSS smo obdelali s programsko opremo PPP, in sicer s programi APPS (angl. Automatic Precise Point Positioning), CSRS-PPP (angl. Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning), GAPS (angl. GNSS Analysis and Positioning Software), magicGNSS, gLAB (angl. GNSS-Lab Tool) in RTKLIB. Vsi programi so brezplačno na voljo na spletu. Za primerjavo rezultatov tahimetrične in GNSS-izmere, ki sta dobljeni v različnih koordinatnih sistemih smo razvili lastno programsko rešitev, s katero smo preverili odstopanja koordinat, določenih v kinematičnem načinu PPP glede na tahimetrično določene koordinate. Dodatno smo preverjali, kako izguba signala med izmero vpliva na določitev in na končno točnost položajev točk.

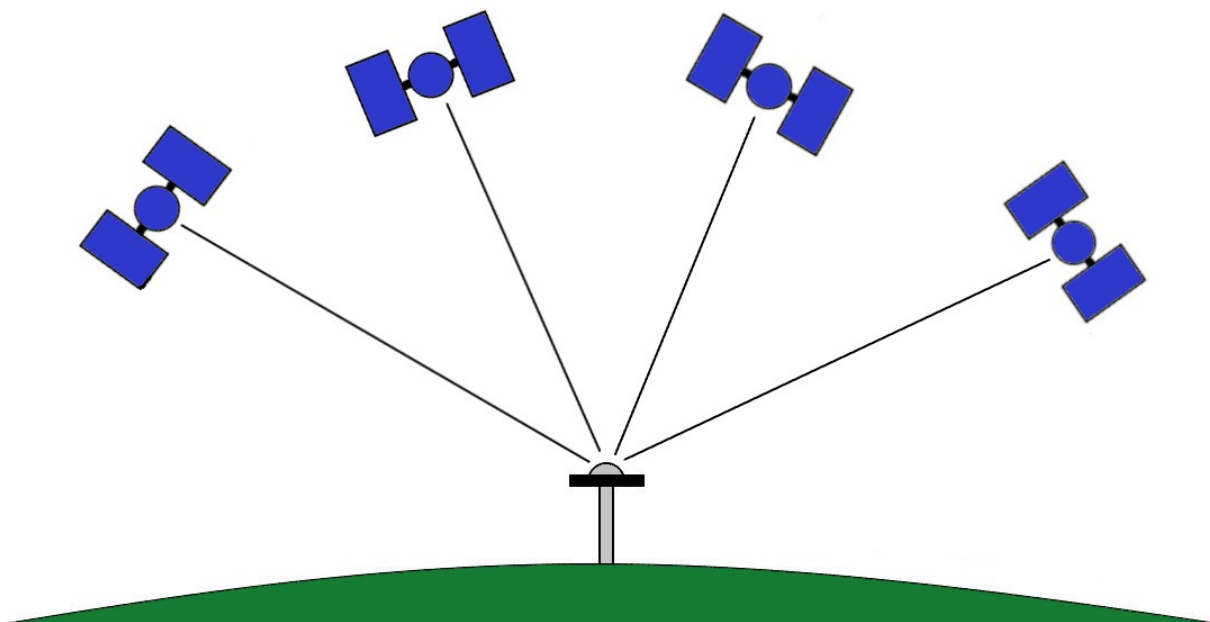
V diplomski nalogi smo najprej predstavili teoretična izhodišča za metodo PPP, vplive na opazovanja in programsko opremo, ki je na voljo na spletu ter omogoča obdelavo opazovanj. Poudarek je na brezplačni programski opremi, ki omogoča kinematično obdelavo opazovanj. V drugem delu naloge smo predstavili preizkus oz. način izvedbe meritev. V zadnjem delu naloge smo predstavili rezultate obdelave opazovanj s programsko opremo PPP in rezultate primerjave tahimetrične in GNSS-izmere ter analizo dobljenih rezultatov.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Metoda Precise Point Positioning (PPP)

Teoretični koncept metode PPP je predstavil R. R. Anderle v 70. letih prejšnjega stoletja, takrat kot določanje položaja z enim sprejemnikom in uporabo stabilnih preciznih orbit ter Dopplerjevih opazovanj satelitov (Kouba in sod., 2001). Kljub temu se metoda praktično ni uveljavila še naslednjih 20 let, ker so relativne metode določanja položaja prevladovale nad absolutnimi. V sredini 90. let se je praktično začela uporabljati metoda PPP, ko so znanstveniki NASE (angl. National Aeronautics and Space Administration) pri JPL (angl. Jet Propulsion Laboratory) ugotovili, da je lahko natančnost določitve položaja določen s PPP primerljiva z natančnostjo položaja pridobljenim z relativnimi metodami (Karabatić, 2011). Od devetdesetih let prejšnjega stoletja se je metoda PPP stalno razvijala. Danes se zraven statičnih opazovanj uporablja tudi za kinematične namene. Posebej uporabna je na območju večjih držav, kjer postavitve kvalitetnega državnega GNSS omrežja predstavlja velike stroške.

Metoda PPP spada med absolutne metode določitve položaja, ki s kombinacijo eno- ali dvo-frekvenčnih faznih in kodnih opazovanj enega samega GNSS sprejemnika ob uporabi preciznih efemerid in popravkov ure satelita omogoča centimetrsko točnost v statičnem načinu in decimetrsko točnost v kinematičnem načinu. Praktično uporabo metode je povečal razvoj koordinatnih sistemov, modelov vplivov na opazovanja GNSS ter dostopnost do vse bolj kakovostnih produktov službe IGS (angl. International GNSS Service), ki omogočajo visoko točnost določitve položaja (Sterle in sod., 2014).



Slika 1: Princip določanja absolutnega položaja z GNSS
(Vir: Paint3D)

2.2 Izračun položaja sprejemnika z metodo PPP

Za izračun sprejemnika v kinematičnem načinu potrebujemo opazovanja z majhnim intervalom registracije satelitskega signala, ponavadi z eno-, dvo- ali petsekundnim intervalom registracije. Z večjim intervalom registracije signala dobimo manj položajev točke, zato je za kinematične aplikacije visoke natančnosti smiselno uporabiti interval registracije pod petimi sekundami.

Izračun položaja z metodo PPP predstavlja spodnja funkcijska povezava med opazovanji in neznankami. Z uporabo dvofrekvenčnega sprejemnika imamo dvofrekvenčna fazna ($L_1 [m]$, $L_2 [m]$) in kodna ($P_1 [m]$, $P_2 [m]$) opazovanja. Položaj sprejemnika v času izmere se izračuna po spodnji enačbi (Sterle in sod., 2014):

$$\begin{aligned} L_1 &= \rho + c\Delta t + T - I + N_1 + \xi + \varepsilon_{L_1} \\ L_2 &= \rho + c\Delta t + T - \gamma I + N_2 + \xi + \varepsilon_{L_2} \\ P_1 &= \rho + c\Delta t + T - I + D_1 + \xi + \varepsilon_{P_1} \\ P_2 &= \rho + c\Delta t + T - \gamma I + D_2 + \xi + \varepsilon_{P_2} \end{aligned} \quad (1)$$

Oznake v enačbi (1) so:

ρ	predstavlja geometrično razdaljo med položajem satelita (X, Y, Z) v času oddaje signala in med položajem sprejemnika (x, y, z) v času sprejema signala;
Δt	pogrešek ure sprejemnika, kjer je c^1 hitrost svetlobe;
T	vpliv nevtralnega dela atmosfere – troposfere;
I	vpliv disperzivnega dela atmosfere – ionosfere ($\gamma = f_1^2/f_2^2$, kjer sta f_1 in f_2 frekvenci obeh nosilnih valovanj L_1 in L_2);
N_1, N_2	fazni nedoločenosti oziroma neznana števila celih valov za fazni opazovanji L_1 in L_2 ;
D_1, D_2	zamika kodnih opazovanj P_1 in P_2 – DCB (angl. Differential Code Biases);
ξ	ostali vplivi, kot so pogrešek položaja in ure satelita, plimovanja, relativnost, preskok faze, odboj signala, nesovpadanje faznega in geometričnega centra antene sprejemnika in satelitov, podrobneje so opisani v poglavju 2.4;
$\varepsilon_{L_1}, \varepsilon_{L_2}, \varepsilon_{P_1}, \varepsilon_{P_2}$	slučajni pogreški faznih in kodnih opazovanj.

Največji vpliv na opazovanja GNSS ima ionosfera, njen vpliv odstranimo s sestavo linearnih kombinacij frekvenc nosilnih valovanj pri faznih in kodnih opazovanjih (L_3, P_3). Linearne kombinacije pri enofrekvenčnih sprejemnikih niso možne. Spodnji enačbi predstavljata linearni kombinaciji za fazna in kodna opazovanja (Sterle in sod., 2014):

$$\begin{aligned} L_3 &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 = \rho + c\Delta t + T + N_3 + \xi + \varepsilon_{L_3} \\ P_3 &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + c\Delta t + T + D_3 + \xi + \varepsilon_{P_3} \end{aligned} \quad (2)$$

Z uporabo linearnih kombinacij (2) dobimo dve novi opazovanji, ki sta neodvisni od vpliva ionosfere. Posledica uporabe dveh novih opazovanj L_3 in P_3 je pretvorba fazne nedoločenosti iz N_1 in N_2 v N_3 . Ta se spremeni iz celega v realno število (angl. Fix to Float). Pretvorita se tudi kodna zamika D_1, D_2 v kodni zamik D_3 . Slučajna pogreška $\varepsilon_{L_3}, \varepsilon_{P_3}$ se povečata za faktor približno 3 glede na slučajne pogreške iz enačb (1).

¹ $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

2.3 Prednosti in slabosti metode PPP

Prednosti metode PPP so (Čadež, 2010; Vok, 2015):

- Za določitev položaja potrebujemo opazovanja le enega sprejemnika. Tako odpravimo omejitev obsega obratovanja roverja, kar znaša največ 20 *km* od baze, in se dodatno izognemo težavam prenosa podatkov med mobilnim in GNSS sprejemnikom.
- Ker metoda PPP spada med absolutne metode določitve položaja, ne potrebujemo opazovanj referenčne postaje, kar pomeni popolno neodvisnost od državnega GNSS omrežja.
- Ker je položaj določen absolutno, kakovost koordinat ni odvisna od oddaljenosti med točkami oz. od dolžin baznih vektorjev, ampak le od kvalitete izvedbe opazovanj in od ustreznega modeliranja vplivov na opazovanja,
- Položaj z metodo se lahko določi absolutno v globalnem koordinatnem sistemu kjerkoli na svetu, saj nismo več vezani na bližino referenčne postaje kot pri relativnih metodah izmere.
- Zaradi neodvisnosti od omrežja stalnih postaj, metoda PPP zmanjša količino merske opreme in posledično zmanjša stroške izmere.
- Metoda PPP se lahko v statičnem načinu uporablja za spremljanje geodinamike območja, za ugotavljanje zgradbe troposfere in kot alternativna metoda določitvi koordinat stalnim postajam (Nistor in sod., 2016).
- V kinematičnem načinu lahko z metodo PPP dobimo koordinate z decimetrsko natančnostjo.

Med slabosti metode PPP štejemo:

- Dalj časa trajajoč postopek inicializacije, v primerjavi z relativnimi metodami izmere.
- Zmanjšano natančnost dobljenih rezultatov s krajšanjem časa opazovanj. Predvsem pri statičnih metodah z daljšanjem časa opazovanj dobimo vedno bolj točne koordinate, kar ne velja za kinematične metode, saj z nenehnim spreminjanjem položaja sprejemnika zmanjšamo natančnost pridobljenih koordinat.
- Pred izvajanjem kinematičnih opazovanj potrebujemo vsaj pol ure neprekinjenih statičnih opazovanj, da se merska oprema inicializira in doseže natančnost pod decimetrom, v oteženih razmerah je čas daljši (Bisnath in sod., 2009).
- Za precizno določitev položaja z najvišjo natančnostjo smo prisiljeni čakati na končne produkte službe IGS, ki so na voljo 14 dni po opravljenih meritvah.

2.4 Vplivi na opazovanja

Kakovost določitve položaja na osnovi GNSS je odvisna od kakovosti opazovanj samih in od geometrijske razporeditve satelitov v trenutku izmere, ki jo ovrednotimo s faktorji DOP (angl. Dillution of Precision) (Bilban, 2014). Poznamo več faktorjev DOP in sicer GDOP (Geometric), PDOP (Position), HDOP (Horizontal), VDOP (Vertical) in TDOP (Time). Vsi DOP faktorji se navezujejo na štiri satelite, ki so najugodnejše razporejeni glede na opazovano točko. Faktor DOP definiramo s prostornino tetraedra, ki ga dobimo s projekcijo štirih najugodnejše razporejenih satelitov v smeri središča krogle. Enotska krogla ima središče v položaju sprejemnika. Na kroglo projicirane točke povežemo, da skupaj tvorijo tetraeder. Prostornina tako dobljenega tetraedra je obratno sorazmerna z vrednostjo DOP faktorjev. V primeru dobre geometrijske razporeditve satelitov je prostornina tetraedra večja in vrednost DOP faktorjev manjša in obratno. Kakovostna določitve položajev točk je možna z DOP faktorji, ki so manjši od 5 (Stopar, 2016).

Kinematična opazovanja so slabše natančnosti in točnosti kot statična opazovanja, vendar so podvržena enakim vplivom kot statična opazovanja, zato je treba vse vplive ustrezno odstraniti ali modelirati. Posebej pomembni so tisti vplivi, ki so po velikosti večji od 1 *cm* (Sterle in sod., 2014).

V nadaljevanju so predstavljeni vsi vplivi, ki so za metodo PPP bistvenega pomena, povzeti so po Bilban (2014), Jelenc (2006), Pavlovčič Prešeren (2016), Sanz Subirana in sod. (2013a), Sterle (2015) in Sterle in sod. (2014). Vplive v splošnem delimo v tri kategorije. V prvo skupino vplivov spadajo vplivi z izvorom v satelitu in njegovi okolici, v drugo skupino vplivov spada vpliv atmosfere, v tretjo skupino vplivov spadajo vsi vplivi ki so posledica sprejemnika ali njegove okolice.

1. Vplivi z izvorom v satelitu

Pogrešek položaja satelitov, satelitovih ur in parametrov vrtenja Zemlje – tirnica satelita, ki jo izračunamo s pomočjo satelita oddanih (angl. broadcast) efemerid je pogrešena, zato je za izračun položaja z ustrezno točnostjo uporaba preciznih produktov službe IGS nujna. S preciznimi efemeridami, preciznimi popravki ure satelita in s parametri vrtenja Zemlje pogreške zmanjšamo na centimetrsko raven. Rezultati obdelave s preciznimi efemeridami so v koordinatnem sestavu ITRF (angl. International Terrestrial Reference Frame). Zadnja realizacija ITRF je ITRF08.

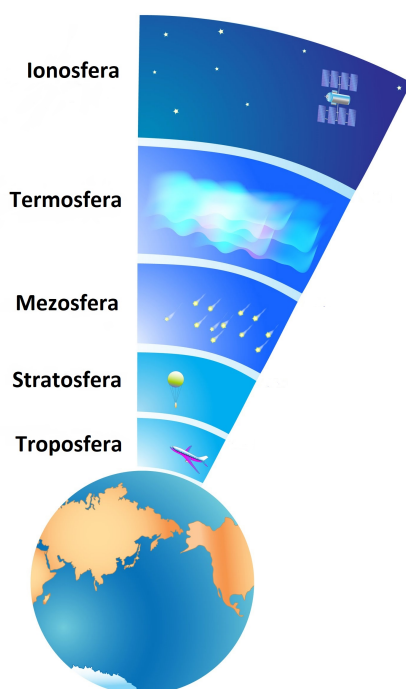
Splošna in posebna relativnost – po splošni teoriji relativnosti se stopnja prehitevanja satelite in sprejemnikove ure razlikuje glede na razliko v gravitacijskem potencialu dveh ur (težnost na tirnici satelita je mnogo manjša kot težnost na Zemlji). Po posebni teoriji relativnosti se razlika pojavi glede na relativno hitrost med obema urama. Splošna relativnost povzroči zaozstajanje ure, posebna prehitevanje ure. Razlika med obema vplivoma relativnosti se razdeli na konstantno in periodično komponento, njuna vsota, ki določa prehitevanje satelite ure glede na uro sprejemnika na Zemlji znaša 38 *ms/dan*. Velikost pogreška relativnosti znaša do 13 metrov v horizontalni komponenti in več kot 20 metrov v vertikalni komponenti. Vpliv obeh relativnosti odstranimo z zmanjšanjem nominalne frekvence signala satelitov. Na tek satelite ure vpliva tudi ekscentričnost tirnice satelita, ki povzroči spremembo hitrosti gibanja satelita in posledično tudi spremembo teka njene ure. Velikost vpliva znaša do 7 metrov. Sagnacov efekt je posledica vrtenja Zemlje, ta se med časom potovanja signala od satelita do sprejemnika zasuče za določen kot, kar posledično vpliva na spremembo geometrične razdalje med satelitom in sprejemnikom. Velikost vpliva znaša do nekaj 10 metrov. Zadnji vpliv je posledica razlike zaradi geometrično merjene in koordinatno računane razdalje satelit–sprejemnik (angl. path range delay). Njena velikost znaša približno 2 centimetra.

Vpliv preskoka faze – preskok faze vpliva le na fazna opazovanja in je posledica lastnosti nosilnih valovanj, oddanih s satelitov. Zaradi elektromagnetne narave desnosučno krožno polariziranih valov se vsaka sprememba položaja satelita okoli zveznice satelit–sprejemnik odraža kot sprememba merjene faze na sprejemniku. Neupoštevanje preskoka faze omogoča le decimetrsko natančnost koordinat merjenih z metodo PPP.

Spreminjanje položaja faznega centra satelitove antene – vsa opazovanja signala GNSS za določitev razdalje med satelitom in sprejemnikom je treba reducirati na geometrični center antene satelita in sprejemnika. Nesovpadanje geometričnega in faznega centra antene satelitov lahko povzroči napako v koordinatah točke tudi več metrov.

2. Vpliv atmosfere

Signal med potovanjem od satelita do sprejemnika preide razne plasti atmosfere. Na signal satelita vplivata ionosfera in troposfera.



Slika 2: Plasti Zemljine atmosfere

(Vir: <https://s-media-cache-ak0.pinning.com/736x/f1/82/10/f18210e251332775f8f7d11f1326441d--earth-layers--years.jpg>)

Vpliv ionosfere – ionosfera je najvišja plast atmosfere, nahaja se približno na višini med 60 km in 1500 km. Definiramo jo kot področje v zgornji atmosferi, ki jo sestavljajo ionizirani prosti elektroni in električno nabite molekule. Vpliv ionosfere je odvisen od števila prostih elektronov TEC (angl. Total Electron Content), vzdolž poti razširjanja signala. Prosti elektroni vplivajo na hitrost razširjanja mikrovalov, tako da podaljšajo čas potovanja signala in posledično dolžino psevdorazdalje. Velikost vpliva ionosfere na elektromagnetno valovanje je odvisna od frekvenca valovanja. Nižja kot je frekvenca valovanja, večji je vpliv ionosfere in obratno. To pomeni, da lahko čez ionosfero prehajajo le valovanja višjih frekvenc. Ionosfera povzroči prehitvanje faze valovanja in zakasnitev kode. Vpliv ionosfere odstranimo z linearno kombinacijo faznih L_3 in kodnih opazovanj P_3 ali z uporabo modelov ionosfere, kot so GIO (angl. Global Ionosphere Maps), NeQuick model in Klobucharjev model. Modele ionosfere uporabimo, ko nimamo na voljo dvofrekvenčnih sprejemnikov.

Vpliv troposfere – troposfera je najnižja plast atmosfere v kateri je zbrano 80 % celotne mase zraka, predstavlja plast, kjer se pojavljajo vremenski pojavi. Nahaja se na višini od 6 km in do 20 km. Kemična sestava troposfere se praktično ne spreminja, razen vsebnost vodne pare, ki se povečuje z izhlapevanjem na zemeljskem površju. Delež vodne pare je blizu Zemlje največji in upada z višino. Ker vpliv troposfere z linearno kombinacijo opazovanj ne moremo odstraniti, jo moramo ustrezno modelirati. Vpliv troposfere T razdelimo na vpliv suhe T_s in mokre komponente T_m . Suha komponenta je stabilna, zato jo lahko ustrezno modeliramo. Njen vpliv znaša od 2,3 do 10 metrov. Vpliv mokre komponente znaša nekaj decimetrov, vendar ga zaradi spreminjanja vodne pare težje modeliramo. Za geodetske naloge visoke natančnosti se vpliv mokre komponente modelira po zvezi Sterle in sod. (2014):

$$T_m = M_m T_m^z + M_g (G_N \cdot \cos(\alpha) + G_E \sin(\alpha)) \quad (3)$$

Oznake v enačbi (3) so:

T_m^z	zenitna troposferska refrakcija mokre komponente;
M_m	projekcijska komponenta zenitne troposferske refrakcije mokre komponente;
G_N, G_E	gradienta troposfere v smeri S–J (G_N) in V–Z (G_E), kjer je α azimut satelita glede na sprejemnik v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu sprejemnika GNSS;
M_g	projekcijska komponenta gradientov troposfere.

Danes je na voljo veliko modelov troposferske refrakcije in modelov projekcijskih komponent troposferske refrakcije, kot so modeli Hopfield, Saastamoinen, Goad–Goodman, Altshulet & Kalaghan, Marini & Murray ter projekcijske komponente Chao, Lanyi, Davis (Cfa-2.2), Herring (MMT) in Neill (MMF) (Pavlovčič Prešeren, 2016).

3. Vplivi z izvorom v sprejemniku in njegovi okolici

Vpliv plimovanj – med vplive plimovanj štejemo plimovanje čvrste Zemlje, oceanov in gibanje Zemljinih polov. Skupno vsem vplivom je, da ne vplivajo na signal satelita, ampak le na položaj sprejemnika v prostoru. Velikost plimovanja čvrste Zemlje znaša do približno 30 centimetrov v višini in do približno 10 centimetrov po obeh horizontalnih komponentah. Vpliv plimovanja na točke, ki so na kopnem je mnogo manjši in znaša manj kot centimeter. Plimovanje polov upoštevamo le, če so opazovanja daljša od dveh mesecev. Velikost vpliva znaša manj kot 2,5 centimetrov v višinski komponenti in približno 7 milimetrov v obeh horizontalnih komponentah.

Nesovpadanje faznega in geometričnega centra antene sprejemnika – začetna točka opazovanj GNSS je fazni center antene satelita, končna točka fazni center antene sprejemnika. Fazni center antene sprejemnika ni stalna točka. Spreminja se v odvisnosti od višinskega kota in azimuta satelita, s katerega je bil signal oddan. Fazna in kodna opazovanja se nanašajo na fazni center anten in ne na geometrijski center anten. Fazni in geometrijski center nista identični točki, zato je treba vsa opazovanja zreducirati na geometrijski center antene satelita in sprejemnika. Pri kinematičnih opazovanjih je težavno upoštevati odmik faznega centra antene, ker antena sprejemnika ni vedno orientirana v določeno smer, ampak se spreminja glede na smer gibanja. Velikost nesovpadanja obeh centrov antene povzroči napako v koordinatah do tudi deset centimetrov.

Vpliv večpotja – definiramo kot odboj signala od objektov, preden ta prispe do sprejemnikove antene. Večpotje je edini sistematični vpliv, ki ga ne moremo modelirati ali odpraviti, zato se v celoti prenese na popravke opazovanj pri statični izmeri oziroma v neznanke pri kinematični izmeri. Odboj je različnega velikostnega reda za kodna in fazna opazovanja. Pri kodnih opazovanjih znaša do 150 metrov, pri faznih do šest centimetrov. Vpliv večpotja zmanjšamo z uporabo posebnih tipov anten z dušenjem (angl. Choke Ring antenna), z nastavitvijo maske višinskih kotov in s skrbno izbiro lokacije točk na terenu. Sodobni GNSS sprejemniki so sposobni vpliv sami prepoznati in ga izločiti iz opazovanj.

Nenadni skoki signala – vsak odboj signala lahko povzroči nenadne skoke signala (angl. cycle slips). To so prekinitve signala med izmero. Ko se med izmero izgubi sprejem signala satelita, pride do skoka vrednosti izmerjene faze za določeno vrednost. Nenadne skoke signala ne povzroči samo odboj signala od objektov, ampak tudi hitri pospeški anten pri kinematičnih meritvah in vpliv ionosfere.

Šum sprejemnika – šum definiramo kot vsoto napak antene, strojne opreme in oscilatorjev, ki sestavljajo sprejemnik. Velikost šuma se razlikuje za vsak tip antene in tip opazovanj. Pri faznih opazovanjih znaša nekaj milimetrov, pri kodnih se giblje okoli decimetra. Zmanjšamo ga z izbiro primerne merske opreme (Čadež, 2010).

3 PREDSTAVITEV PROGRAMSKE OPREME PPP

Na spletu je poleg produktov analiznih centrov, kot sta IGS in ESA (angl. European Space Agency), na voljo veliko produktov, ki omogočajo obdelavo GNSS opazovanj z metodo PPP. Razvili so jih večinoma analizni centri, univerze, vladne agencije in posamezniki. Nekateri so brezplačno na voljo na spletu (Karabatić, 2011). Poznamo tudi individualne programe, ki jih lahko poganjamo sami in so brezplačno na voljo za prenos. Programsko opremo smo razdelili na dva dela, na programe, ki jih uporabljamo preko spletnega brskalnika in na programe, ki si jih naložimo na računalnik in jih poganjamo sami.

Programi z uporabo spletnega brskalnika

1. **Canadian Spatial Reference System (CSRS), CSRS-PPP** (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>), Natural Resources Canada,
2. **GPS Analysis and Positioning Software (GAPS)** (<http://gaps.gge.unb.ca/index.html>), University of New Brunswick, Canada,
3. **Automatic Precise Positioning Software (APPS)** (<http://apps.gdgps.net/index.php>), Jet Propulsion Laboratory (JPL), ZDA,
4. **MagicGNSS** (<https://magicgnss.gmv.com/ppp>), GMV, Madrid,
5. **AUSPOS - Online GPS Processing Service** (<http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>), Geoscience Australia,
6. **Scripps Coordinate Update Tool (SCOUT)** (<http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>), Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), Scripps Institution of Oceanography (SIO), University of California,
7. **Online Positioning User Service (OPUS)** (<https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ZDA,
8. **Trimble RTX** (<http://trimblertx.com/>), Trimble Navigation Limited.

Samostojni programi

1. **GNSS-Lab Tool (gLAB)** (<http://gage.upc.edu/gLAB>), European Space Agency,
2. **RTKLIB** (<http://www.rtklib.com/>), Tomoji Takasu, University of Marine Sciences and Technology, Tokio,
3. **BERNESE** (<http://www.bernese.unibe.ch/>), Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB).

Spletna stran <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html> predstavi prve štiri spletne storitve PPP in omogoča neposredno pošiljanje opazovanj do vseh štirih storitev naenkrat. Vsi spletni programi uporabljajo precizne produkte službe IGS in tako zagotavljajo obdelavo statičnih ali kinematičnih opazovanj za vsako poslano RINEX datoteko. Možna je kombinacija GPS, GLONASS in Galileo satelitov, odvisno od programa. Kinematično obdelavo opazovanj omogočajo le CSRS-PPP, GAPS, APPS, magicGNSS in gLAB ter RTKLIB. Vse programe razen BERNESE lahko uporabljamo brezplačno. Podroben opis programov, ki omogočajo kinematično obdelavo opazovanj sledi v nadaljevanju. Najprej so predstavljeni spletni programi CSRS-PPP, GAPS, APPS in MagicGNSS, nato samostojna programa gLAB ter RTKLIB.

3.1 CSRS-PPP

Government of Canada | Services | Departments | Français

Natural Resources Canada

Canada.ca | Services | Departments | Français

Energy | Mining/Materials | Forests | Earth Sciences | Hazards | Explosives | The North | Climate Change

Home → Earth Sciences → Geomatics → Geodetic Reference Systems → Tools and Applications → Precise Point Positioning

Precise Point Positioning

Help for CSRS PPP (Updated 2017-01-26)

Profile Sign out

Email for results (required)

simon.sanca22@gmail.com

Processing mode

Static Kinematic

NAD83 ITRF

- The epoch will be the same as the GPS data.
- A UTM zone will be calculated from the longitude.

Vertical datum

CGDV28(HT2_0)

More options

RINEX observation file (required) (.zip, .gzip, .gz, .Z, .??O)

Choose File smartppp.17o

Submit to PPP

Use of Canadian Geodetic Survey products and data is subject to the [Open Government Licence - Canada](#)

[Geodetic Reference Systems Information](#)

Slika 3: Spletna storitev CSRS-PPP

(Vir: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>)

Spletno storitev CSRS-PPP so razvili pri National Resources Canada. Storitev je brezplačna, potrebna je samo registracija z uporabniškim imenom in geslom. CSRS-PPP omogoča naknadno obdelavo opazovanj z uporabo satelitov GPS in GLONASS, ki jih uporabnik preko interneta v obliki RINEX datoteke naloži na spletno stran. Z uporabo preciznih efemerid in preciznih popravkov ur so izračunane koordinate točk določene z najvišjo možno absolutno natančnostjo ne glede na položaj na Zemlji. Edina omejitev pri obdelavi opazovanj je čas trajanja opazovanj. Velja pravilo, da naj maksimalna dolžina opazovanj ni večja od 6 dni, oz. stisnjena RINEX datoteka naj ni večja od 100 MB. Pri minimalni dolžini opazovanj ni omejitev, vedeti moramo le, da s krajšimi opazovanji ne dobimo ustrezne rešitve. Izračunan položaj točke je lahko podan v severnoameriškem datumu NAD83 (angl. North American Datum 1983) ali v referenčnem koordinatnem sestavu ITRF. Uporabnik ima omejeno svobodo izbire pri obdelavi opazovanj, saj spletna storitev omogoča le izbiro koordinatnega sestava, načina obdelave, ki je lahko statičen ali kinematičen in izbiro višinskega datuma, ki je vezan na Kanado. Z omejitvijo izbora nastavitvev spletna storitev zagotavlja najboljšo možno rešitev, ki jo je možno dobiti na osnovi RINEX datoteke z opazovanji.

Uporabniki z operacijskim sistemom Windows si lahko brezplačno prenesejo namizni program PPP direct, ki omogoča obdelavo GNSS opazovanj brez uporabe spletnega brskalnika. Program je popolnoma enak spletni storitvi. Edina razlika je način dostopa do njega. Vrstni red obdelave opazovanj je sledeč (CSRS, 2017):

1. Obdelava L1 in L2 kodnih in faznih opazovanj,
2. obdelava L1 kodnih opazovanj (uporabi se le takrat, ko s prvim načinom obdelave ni mogoče določiti položaja).

V primeru neuspešne obdelave program javi napako na elektronski naslov.

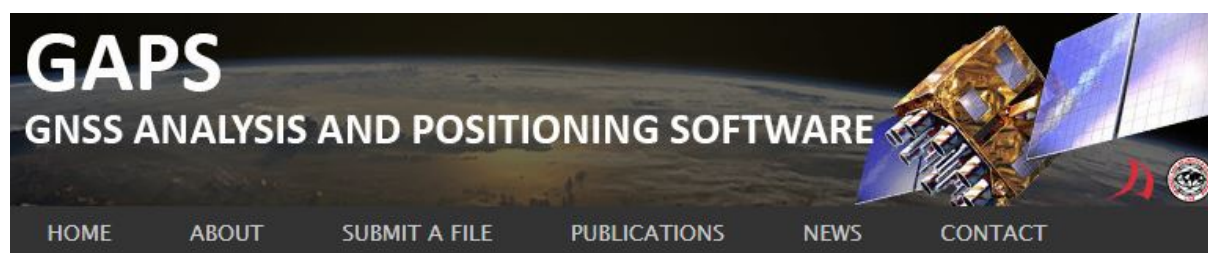
Storitev CSRS-PPP določi položaj v prostoru, dve položajni koordinati in višino faznega centra antene APC (angl. Antenna Phase Centre). Za pridobitev višine označene točke na terenu moramo poznati vertikalno razdaljo med označbo točke in med referenčno točko antene ARP (angl. Antenna Reference Point) ter razdaljo med ARP in faznim centrom antene APC. Storitev upošteva razdaljo, med označbo točke in ARP, ki je zapisana v glavi RINEX datoteke, ki vsebuje tudi podatek o tipu sprejemnikove antene. Razdalja med fazno in referenčno točko antene je določena s kalibracijo v laboratoriju. Vrednosti absolutnih kalibracijskih parametrov vsebuje ANTEX datoteka, ki jo pripravlja službi IGS in NGS. CSRS-PPP upošteva omenjene vrednosti (CSRS, 2017; Čadež, 2010).

Rezultate obdelave dobimo prek elektronske pošte, ki vsebuje pdf poročilo o obdelavi z grafičnimi upodobitvami, .csv datoteko z geodetskimi koordinatami v ITRF, datoteko .pos s koordinatami v ITRF in v UTM s pripadajočimi natančnostmi, datoteko .res s podatki o satelitih in datoteko .sum, v kateri so zbrani osnovni podatki o obdelavi. Za podrobnejšo analizo končnih rezultatov je najpomembnejša datoteka .sum, ki je sestavljena iz treh delov (CSRS, 2017; Čadež, 2010).

1. **File Summary – povzetek datoteke** vsebuje vhodne, izhodne in interne datoteke, ki so bile uporabljene pri obdelavi.
2. **Summary of Processing Parameters – pregled podatkov obdelave**, vsebuje podatke, kot so omejitev filtra Cycle Slip (2.1), popravek faznega centra anten posameznih satelitov (2.2), popravek faznega centra GNSS sprejemnika (2.3), transformacijske parametre med ITRF in NAD83 (CSRS) (2.4), koeficiente plimovanja morja (angl. Ocean loading coefficients) (2.5), meteorološke podatke (2.6) in uporabljene troposferske modele (2.7).
3. **Session Processing Results – pregled rezultatov obdelave**, v tem delu datoteke so zbrane vse nastavitve obdelave (3.1), poročilo o opazovanjih (3.2), ocenjene koordinate (3.3), razlike med koordinatami (3.4), ocena pogreška sprejemnikove ure (3.5) in pogreški satelitov (3.6).

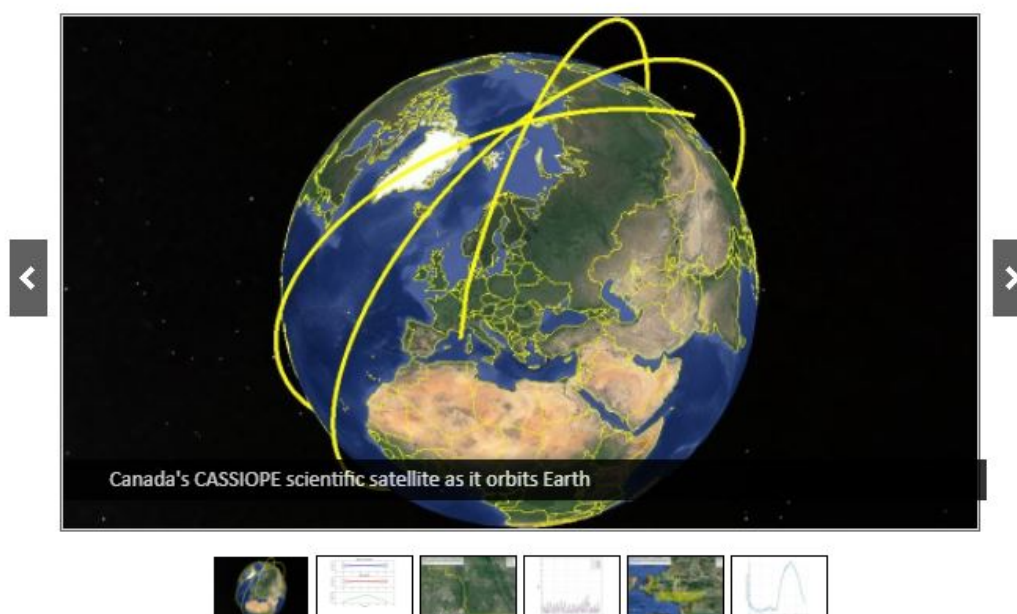
3.2 GAPS

Spletno storitev GAPS je razvil Rodrigo Leandro z Univerze v New Brunswicku v Kanadi leta 2007. Cilj storitve GAPS je ponuditi uporabnikom brezplačno orodje za obdelavo opazovanj z metodo PPP. GAPS prav tako kot ostale spletne storitve omogoča obdelavo običajnih in stisnjenih RINEX datotek. Maksimalna dolžina opazovanj znaša 24 ur, kar je enakovredno enemu GPS dnevu. Glede dolžine trajanja opazovanj znotraj enega GPS dneva ni omejitev (Čadež, 2010; GAPS, 2017).



GAPS

GAPS provides users with accurate satellite positioning using a single GNSS receiver both in static and kinematic mode. Through the use of precise orbit and clock products provided by sources such as the International GNSS Service (IGS) and Natural Resources Canada (NRCAN), it is possible to achieve centimetre-level positioning in static mode and decimetre-level positioning in kinematic mode given a sufficient convergence period. In case you are new to PPP, please, consider checking our [PPP: Best Practices page](#).



An example of the results produced by GAPS (Station SIN1, Singapore, on January 7th, 2016, processed in static mode) can be seen [here](#). Have any questions? Check out the FAQ page [here](#) or contact us [here](#).

Slika 4: Spletna storitev GAPS
(Vir: <http://gaps.gge.unb.ca/about.html>)

Storitev GAPS uporabnikom pod zavihkom PPP: Best Practices prikaže najboljši način obdelave opazovanj za zagotovitev najvišje možne natančnosti. Opisan je pomen dolžine trajanja opazovanj, ki pravi, da so končni položaji z daljšanjem opazovanj natančnejši, GAPS hkrati opominja uporabnika, da je za centimetrsko natančnost potrebno izvajati neprekinjeno statično izmero vsaj dve do tri ure. Naslednje navodilo se veže na uporabo produktov IGS. Za najboljši rezultat je priporočena uporaba preciznih efemerid. Tretje navodilo se veže na čas, ki je potreben, da se opazovanja približajo centimetrski natančnosti. Brez uporabe preciznih popravkov ur znaša čas za doseg centimetreške natančnosti od dve do tri ure. Z uporabo preciznih popravkov ur se ta zmanjša na eno uro.

Prednost storitve GAPS je zagotovo kombinacija GNSS sistemov (GPS, Galileo in BeiDou), vendar storitev ne omogoča uporabe GLONASS satelitov, kar je ena izmed slabosti spletne storitve. Navodila za uporabo evropskega in kitajskega sistema pri obdelavi so opisana na spletni strani. Uporabnik lahko uporabi osnovni (angl. basic) ali napredni (angl. advanced) način obdelave opazovanj.

1. **Osnovni način** omogoča le izbiro satelitov, vnos približnih koordinat sprejemnika, statično ali kinematično obdelavo in izbiro višinskega kota.
2. **Napredni način** omogoča vse lastnosti osnovnega načina obdelave ter dodatne nastavitve, kot so izbira uporabljenih produktov tirnic in popravkov ur satelita, izbira frekvenc za vsak satelitski sistem posebej, dolžino trajanja opazovanj, število iteracij na epoho, izločitev satelitov z visokim GDOP faktorjem, modeliranje atmosfere, izris .kml datoteke, kalibracijo anten in upoštevanja plimovanja oceanov.

Obdelava opazovanj poteka enako kot pri ostalih spletnih storitvah. Prek interneta naložimo RINEX datoteko in na elektronski naslov dobimo rezultate obdelave. V primeru neuspešne obdelave nas program obvesti, da obdelava ni bila uspešna. Položaji točk so izračunani glede na zadnjo realizacijo ITRF, to je ITRF08. Lahko si izberemo tudi ETRF namesto ITRF, kar je za evropske uporabnike prednost. Rezultati obdelave opazovanj so zbrani v formatu .html, ki vsebuje poročila in grafične upodobitve razvrščene v poglavja. Osnovni podatki vsebujejo podatke o času in trajanju opazovanj, podatke o uporabljenih produktih IGS, podatke o merski opreми, razliko med ARP in APC, končne koordinate in grafično upodobitev konvergence koordinat, vpliva atmosfere v smeri zenita, vpliva ionosfere, DOP faktorjev ter popravkov opazovanj. Izračunani položaji točk z natančnostmi so zbrani v datoteki .par v obliki geodetskih in kartezičnih koordinat (GAPS, 2017).

3.3 APPS

Spletna storitev APPS izvira iz ZDA, razvili so jo znanstveniki NASE pri JPL. Obdelavo opazovanj omogoča programska oprema GIPSY-OASIS, ki z uporabo efemerid satelitov, dobljenih v realnem času iz sistema GDGPS (angl. Global Differential GPS) ali preciznih dnevnih in tedenskih efemerid od JPL, omogoča obdelavo statičnih ter kinematičnih opazovanj GPS. Kinematična opazovanja se lahko obdelajo v aeronavtičnem oz. letečem načinu, kar je primerno za leteče predmete. Slabost storitve APPS je v tem, da omogoča le obdelavo opazovanj satelitov GPS. Uporaba storitve je brezplačna. Statični način obdelave se lahko uporablja brez registracije, kinematični zahteva registracijo z uporabniškim imenom in geslom (APPS, 2017).

Program GIPSY-OASIS omogoča obdelavo GPS faznih in kodnih opazovanj eno- in dvofrekvenčnih sprejemnikov. Upoštewane so tiste efemeride, ki omogočajo najboljšo rešitev. Program sam razredči opazovanja na petminutne intervale, zato interval registracije pri statičnih opazovanjih ni pomemben. Za kinematične meritve je možno nastaviti manjši interval redčenja opazovanj.

Uporabnik lahko opazovanja posreduje:

- neposredno preko zavihka Instant Positioning, kamor naloži RINEX datoteko z opazovanji in izbere način obdelave ter višinski kot,
- posredno preko elektronske pošte in z uporabo anonimnega FTP (angl. File Transfer Protocol) strežnika. V elektronski pošti navede uporabniško ime, način obdelave ter višinski kot in URL (angl. Uniform Resource Locator) povezavo do RINEX datoteke, ki jo predhodno naloži na FTP.
- neposredna obdelava je možna s pomočjo Nasinega varnega FTP strežnika, za katerega je potrebno dovoljenje, ki ga uporabnik dobi s prošnjo.

Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

GDGPS
Jet Propulsion Laboratory

+ View the NASA Portal

JPL HOME EARTH SOLAR SYSTEM STARS & GALAXIES TECHNOLOGY

The Automatic Precise Positioning Service
of the
Global Differential GPS System

Welcome to APPS!
The Automatic Precise Positioning Service
of the Global Differential GPS (GDGPS) System.

APPS is now using GIPSY 6.4

APPS accepts GPS measurement files, and applies the most advanced GPS positioning technology from NASA's Jet Propulsion Laboratory to estimate the position of your GPS receivers, whether they are static, in motion, on the ground, or in the air. APPS employs:

- Real-time GPS orbit and clock products from JPL's [GDGPS](#) System
- JPL's daily and weekly precise GPS orbit and clock products
- JPL's GIPSY-OASIS software for processing the GPS measurements

APPS continues to provide JPL's venerable AutoGIPSY (AG) service - for *free*, for static post-processing (e.g. measurement latency of a week or more), but also offers new and unique services:

- APPS will generate a time series of positions if your receiver was in motion
- APPS has access to real-time GPS orbit and clock products so you never have to wait
- APPS is fast. Positioning is available in seconds

Fly-Land-Send - APPS will estimate your flight trajectory within minute s after submission.

APPS supports a diverse customer base, from occasional users to heavy-duty industrial users. Occasional users may upload their measurement files manually through this web site. Heavy-duty users will receive Secure FTP access to our servers, to which they can upload their measurement files, and more easily automate their processing. It is also possible to interface with APPS through e-Mail.

APPS supports input in RINEX 2, RINEX 2.11 input files, GIPSY TDP files

Give APPS a try... *Instant Positioning*

Slika 5: Spletna storitev APPS
(Vir: <http://apps.gdgps.net/>)

Podatki opazovanj morajo biti zapisani v formatu RINEX, ime datoteke je poljubno. Uporabnik lahko izbira med štirimi načini obdelave, med statično, kinematično, najbolj natančno (angl. Most Accurate) in obdelavo blizu realnega časa (angl. Near Real Time). Pri statičnem načinu dobimo samo en niz koordinat opazovane točke, pri kinematičnem načinu dobimo niz koordinat za vsako epoho posebej. Pri obdelavi blizu realnega časa je možno obdelati le opazovanja, stara manj kot en dan. Pri najbolj natančni obdelavi storitev obdelava opazovanja takrat, ko so na voljo natančne precizne efemeride, to je 14 dni po izvedbi opazovanj. (APPS, 2017; Čadež, 2010).

Rezultati obdelave so podani kot:

- položajne koordinate in višine točk v ITRF05,
- urino stanje sprejemnikove ure, izračunano za vsako epoho,
- mokra komponenta troposferske refrakcije in njen gradient,
- neznano število celih valov kot realno število.

Vsi položaji točk so pridobljeni v ITRF05. Elipsoidne koordinate so vezane na elipsoid WGS84 ($a = 6378136.6$, $1/f = 1/298.25642$). Rezultati obdelave so poslani uporabniku na njegov elektronski naslov in vsebujejo datoteke s končnicami (APPS, 2017; Čadež, 2010):

- *.sum* s statusom procesiranih podatkov, glavnim izhodom podatkov in seznamom izhodnih podatkov,
- *.stacov* s koordinatami X, Y, Z in kovariancami; velja samo za statična opazovanja,
- *.tpd* s časom in koordinatami X, Y, Z v formatu GIPSY TPD,
- *.ninjalg* s sporočili programa GIPSY in statistiko,
- *.rgnml* s kalibracijskimi podatki anten satelitov,
- *.pfs*, ki vsebujejo vektorje popravkov po izravnavi,
- *.gd* z elipsoidnimi koordinatami φ, λ, h in oceno natančnosti.

3.4 MagicGNSS

Storitev magicGNSS so razvili v podjetju GMV Innovationg Solution s sedežem v Madridu. Program sestavljata dva dela, storitev ODTS (angl. Orbit Determination & Time Synchronization) in PPP. ODTS je namenjen izračunu preciznih efemerid in modeliranju vpliva ionosfere, storitev PPP izračunu koordinat točk v globalnem koordinatnem sistemu. Storitev magicGNSS omogoča obdelavo statičnih in kinematičnih opazovanj GPS, GLONASS in Galileo. Kinematična opazovanja se lahko obdelajo v terestričnem in aeronavtičnem načinu, kar je posebej uporabno pri GNSS sprejemnikih na letelih predmetih, kot so droni, manjša letala ipd. GLONASS opazovanja so popolnoma združljiva s produkti službe IGS za opazovanja GPS. Trenutno je možna obdelava dvofrekvenčnih opazovanj (Čadež, 2010; MagicGNSS, 2017).



Welcome to the email version of *magicGNSS*/PPP (Precise Point Positioning), now processing **static** and **kinematic** GPS, GLONASS and GALILEO real-time data in RINEX format. Only **dual-frequency** PPP is supported at the moment.

Real-time GPS, GLONASS and GALILEO orbits and clocks needed by PPP are generated internally. Satellite products rate is 1 min. *Rapid* and *final* GPS orbits and clocks from IGS are also available. *Final* IGS clock rate is 30 sec.

Please follow these instructions:

- Send an email to magicppp@gmv.com with the Subject **Static** or **Kinematic** and one RINEX observation file attached (or a maximum of two files for static PPP).
- The attached files must be in standard or Hatanaka RINEX 2.00, 2.10, 2.11, 3.00, 3.01 or 3.02 format, compressed or not.
- The filenames must follow the RINEX filename convention: daily, hourly, high-rate; if your file is compressed, you must keep the RINEX filename extension **and** the compression extension (for example **gap10750.14o.gz**)
- The file attached can be an **unique compressed** file containing more than one RINEX.
- The files can be compressed in the following formats: .Z, .gz and .zip.
- The RINEX data rate must be one of the following, in seconds: 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 and 300.
- The RINEX file must contain all of the following observables: P1 (or C1), P2, L1, L2.
- GPS data earlier than **2009/01/01** and GLONASS/GALILEO data earlier than **2014/01/01** cannot be processed.
- Real-time GPS, GLONASS and GALILEO orbits and clocks needed by PPP are generated internally. It is possible to force the use of IGS products writing in the email **body**:
Products: IGS
 In addition, if the products themselves are not available, the IGS products will be used automatically.
- In static PPP, if you attach **two RINEX** files and they belong to the same station, you will also get the comparison of the two PPP results (difference of coordinates).
- Kinematic PPP can be used in two modes: **Terrestrial** (default) and **Aeronautical**. This is configured within the email **body**, for example:
 To: magicppp@gmv.com
 Subject: Kinematic
 Aeronautical
- It is possible to process GPS-only and GPS+GLONASS in PPP. This is configured according to the email **Subject**:
Static/Kinematic = GPS+GLONASS
Static/Kinematic GR = GPS+GLONASS
Static/Kinematic G = GPS-only
- **WARNING:** emails from the *magicGNSS*/PPP service might be identified as **spam** by your email system!

Slika 6: Spletna storitev magicGNSS
(Vir: <https://magicgnss.gmv.com/ppp>)

Navodila za uporabo storitve so podrobneje opisana na spletni strani. Uporabnik vhodno datoteko v formatu RINEX ali Hatanaka RINEX pošlje prek elektronske pošte na naslov magi-cppp@gmv.com z zadevo Static ali Kinematic. Storitev sama izračuna precizne efemeride in popravke ure s pomočjo ODTS. Možna je uporaba produktov IGS, vendar mora na to uporabnik opozoriti v elektronski pošti. Intervali registracije so lahko 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 ali 300. RINEX datoteka mora vsebovati kodna (P1 ali C1, P2) in fazna (L1, L2) opazovanja. Približne koordinate ne smejo biti 0 in tip antene mora biti usklajen s podatki službe IGS. Če navedena pravila niso upoštevana, bo program javil napako (Čadež, 2010; MagicGNSS, 2017).

Rezultati obdelave s storitvijo magicGNSS so poslani uporabniku po elektronski pošti in so podani v štirih datotekah (MagicGNSS, 2017).

- *estimated_station_clock.clk*; datoteka vsebuje ocenjene parametre sprejemnikove ure v 5-minutnih intervalih,
- *estimated_ztd.txt*; v tekstovni datoteki so zbrani parametri vpliva troposfere v smeri zenita,
- *kips_ITRF08.txt*; v datoteki so zbrani vsi kinematično določeni položaji v kartezičnih in geodetskih koordinatah s pripadajočimi natančnostmi,
- *ppp_report.pdf*; je poročilo o obdelavi opazovanj, v njej so zbrane osnovne nastavitve obdelave, uporabljeni sateliti, odstopanja, grafična predstavitev koordinat točk z odstopanji.

3.5 GLAB



Slika 7: Program gLAB
(Vir: (GLAB, 2017))

Program gLAB je odprtokodni, interaktivno–izobraževalni program za obdelavo in analizo podatkov GNSS, ki ga je razvila Evropska vesoljska agencija – ESA v sodelovanju z raziskovalno ekipo za astronomijo in geomatiko (gAGE) Univerze Politecnica de Catalunya (UPC) v Barceloni. GLAB omogoča precizno modeliranje in obdelavo GNSS opazovanj na centimetrskem nivoju. Vsak vir pogreška se z gLAB samostojno oceni in modelira, kar je bistvenega pomena za izobraževalne namene. Uporabnost programa dodatno olajša grafični uporabniški vmesnik, ki delo s programom poenostavi. GLAB podpira širok spekter standardnih formatov za GNSS kot so RINEX-3.00, RINEX-2.00, ANTEX, SINEX ipd. Sočasna uporaba satelitov GPS, GLONASS in Galileo omogoča precizne rezultate obdelave. Zadnja različica programa je gLAB 5.0.0. Program omogoča obdelavo v načinu Standard Point Positioning (SPP) in Precise Point Positioning (PPP).

Prednosti programa gLAB so predvsem:

- visoka natančnost določitve položaja,
- odprtokodnost in prilagodljivost,
- enostavnost uporabe,
- dostop do notranjih izračunov,
- fleksibilnost programa in delovanje na operacijskih sistemih Windows in Linux,
- poganjanje programa iz ukazne vrstice.

Slabost programa gLAB je v tem, da obdelava položaje le vsakih 30 sekund, zato za kinematična opazovanja ni uporaben, ker vrne manj položajev merjenih točk.

Program je podrobno predstavljen na spletni strani (<http://gage.upc.edu/gLAB>), kjer se nahaja podrobna dokumentacija o programu (angl. gLAB User Manual) z opisom vseh funkcij in značilnosti. V nadaljevanju predstavljamo najpomembnejše značilnosti programa, ki so bistvenega pomena za kinematično obdelavo opazovanj.

GLAB sestavljajo trije moduli:

1. modul za obdelavo (angl. Data Processing Core (DPC)),
2. modul za analizo (angl. Data Analysis Core (DAC)),
3. grafični uporabniški vmesnik (angl. Graphical User Interface (GUI)),

Modul za obdelavo (DPC) izvršuje vse algoritme, ki so namenjeni obdelavi RINEX datoteke in omogoča izbiro načinov obdelave. Kličemo ga lahko neposredno s pomočjo ukazne vrstice ali s pomočjo grafičnega vmesnika. Modul za analizo (DAC) omogoča grafično analizo in primerjavo rezultatov. Oba modula sta vgrajena v grafični vmesnik in ju lahko kličemo od tam. Grafični uporabniški vmesnik (GUI) modula DPC in DAC poveže v celoto in omogoča uporabo obeh znotraj vmesnika.

Za metodo PPP se izbere podlaga PPP (angl. PPP Template). Vhodne podatke za obdelavo; opazovanja RINEX, precizne efemeride, popravke ure satelita in sprejemnika ter absolutne kalibracije anten (ANTEX) s pomočjo programa poiščemo in beremo iz diska. Če je izbran vir ionosfere, ga program bere iz navigacijske RINEX datoteke najbližje stalne postaje. V modulu Preprocess nastavimo višinski kot, linearno kombinacijo opazovanj za odpravo vpliva ionosfere, interval računanja položajev točk (angl. Data Decimation) in število uporabljenih GPS satelitov, saj je trenutno možna le uporaba GPS satelitov. Modul Modelling modelira in upošteva vse našteje vplive na opazovanja. Vse nastavitve so že predhodno nastavljene, razen popravkov ionosfere ter popravkov zamika kodnih opazovanj P1–P2. Modul Filter omogoča izbiro načina obdelave z uporabo Kalmanovega filtra. Za kinematično obdelavo je pomembna obdelava v obe

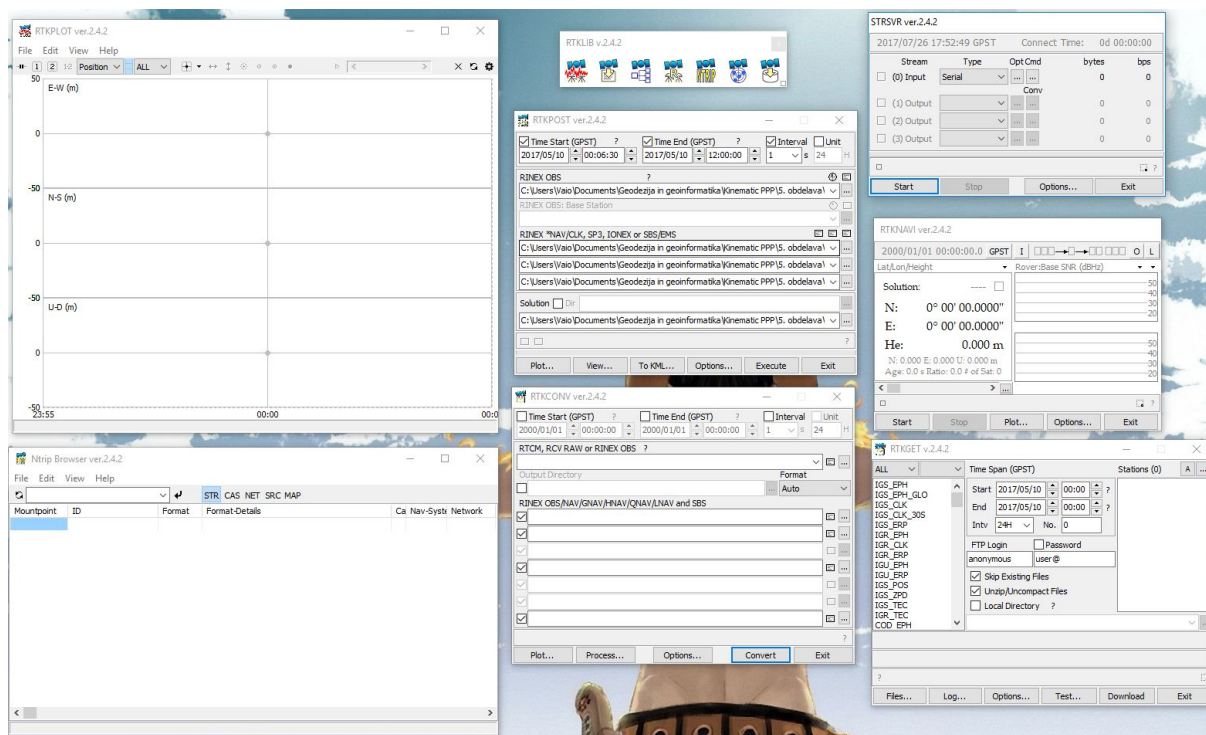
smeri (angl. backward filtering). To pomeni da se RINEX datoteka obdela v obe smeri, od začetka do konca in nazaj. Tak način obdelave je bolj natančen in uporaben pri kinematičnih meritvah. Na koncu izberemo še izpis rezultatov s klikom na Output, ki nam v .out datoteko izpiše rezultate obdelave. Datoteka se sestavi glede na izbiro izpisov informacij o obdelavi. Vsebina izhodnih sporočil se lahko poljubno izbere. Sporočila, ki jih lahko uporabnik izpiše so (GLAB, 2017).

- INFO sporočilo, vsebuje konfiguracijo obdelave,
- CS (Cycle-Slip) sporočilo, vsebuje informacije o nenadnih skokih signala,
- INPUT sporočilo, vsebuje podatke o vhodnih podatkih,
- MEAS sporočilo, vsebuje podatke o meritvah satelitov za vsako epoho,
- MODEL sporočilo vsebuje vrednosti vplivov na opazovanja in položaje satelitov v kartezičnem koordinatnem sistemu z vektorji hitrosti,
- EPOCHSAT sporočilo vsebuje podatke o satelitih, ki so bili uporabljeni za izračun položaja v vsaki posamezni epohi,
- PREFIT sporočilo sestavljajo vsa modelirana opazovanja z odstopanji enačb popravkov,
- POSTFIT sporočilo vsebuje vsa opazovanja s popravki filtra po izravnavi,
- FILTER sporočilo vsebuje ocenjene vrednosti položajev točk z ocenami sprejemnikove ure, popravkov troposfere in vrednostmi faznih nedoločenosti,
- OUTPUT sporočilo je končni rezultat obdelave. Vsebuje izračunane položaje sprejemnika v kartezičnih in geodetskih koordinatah z odstopanji. Sporočilo predstavi DOP faktorje med izmero (GDOP, PDOP, TDOP, HDOP, VDOP) in vpliv troposfere.

Za grafično predstavitev rezultatov obdelave uporabimo modul Analysis. Možnih je 12 primerov izrisa grafov:

- odstopanje v smeri Northing-Easting-Up (angl. NEU Positioning Error),
- odstopanje v horizontalni smeri,
- vpliv troposfere v odvisnosti od časa opazovanj,
- ionosferske kombinacije,
- DOP faktorji glede na čas izmere,
- izris trajektorij satelitov,
- fazne nedoločenosti,
- vpliv večpotja in šuma sprejemnika,
- modeliranje relativističnih komponent,
- odstopanja enačb popravkov in vektorja popravkov po izravnavi
- primerjava orbitalnih vrednosti in popravkov ure.

3.6 RTKLIB



Slika 8: Programski paket RTKLIB
(Vir: (RTKLIB, 2017))

RTKLIB je odprtokodni programski paket za obdelavo opazovanj GNSS z različnimi načini obdelave. Program je razvil japonski znanstvenik Tomoji Takasu iz University of Marine Science and Technology v Tokiu. Dokumentacija programa RTKLIB (http://www.rtklib.com/rtklib_document.htm) vsebuje podrobne informacije o programu. Zadnja različica programa je rtklib_2.4.2. V nadaljevanju predstavljamo značilnosti programa, obdelavo opazovanj in rezultate obdelave. Glavne prednosti programa so (RTKLIB, 2017):

- podpora standardnih in preciznih algoritmov obdelave z uporabo satelitov GPS, GLO-NASS, Galileo, QZSS, BeiDou in SBAS,
- možnost obdelave opazovanj v realnem času in z naknadno obdelavo; možnih je več načinov obdelave in sicer; standardni (angl. single point positioning), statični, kinematični, diferencialni (DGNSS), premikajoči z baznimi vektorji, fixed, PPP-statični, PPP-kinematični in PPP-fixed,
- podpora širokega spektra GNSS formatov.

Za uporabo programa prenesemo celotni programski paket z vsemi knjižnicami in ga razširimo na disk. Ponavadi je to neposredna lokacija na disku C. Program vsebuje več knjižnic in funkcij, ki jih lahko samostojno uporabljamo. Naštejmo nekaj glavnih:

- RTKLAUNCH – glavni program, ki ga lahko uporabljamo za zagon ostalih programskih paketov,
- RTKNAVI – obdelava v realnem času z uporabo surovih GNSS opazovanj, v statičnem, kinematičnem in OTF (angl. On-the-fly) načinu,

- RTKPOST – naknadna obdelava opazovanj v vseh možnih načinih in z uporabo preciznih produktov,
- RTKPLOT – orodje za izris in grafično upodobitev položajev točk v globalnem ITRS koordinatnem sistemu ter izrisom odstopanj,
- RTKCONV – pripomoček za pretvorbo surovih GNSS opazovanj v format RINEX, podoben programu WinTEQC,
- RTKGET – orodje za prenos vseh tipov efemerid, popravkov ur sprejemnika in navigacijskih sporočil,
- STRSVR (angl. Stream Server) – omogoča komunikacijo med GNSS sprejemnikom in programom RTKNAVI pri izmeri v realnem času,
- Ntrip Browser (angl. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) – komunikacijski protokol za izmenjavo podatkov GNSS, kot so opazovanja, efemeride in popravki pri uporabi izmere DGNS in RTK.

Za obdelavo meritev smo uporabili programa RTKPOST in RTKPLOT. S prvim obdelamo opazovanja, z drugim grafično predstavimo trajektorije točk, spreminjanje položaja točk med izmero v smeri S–J, V–Z in Up–Down, hitrost gibanja sprejemnika med izmero in število satelitov med izmero. Za obdelavo opazovanj potrebujemo RINEX datoteko opazovanj, RINEX navigacijsko datoteko, precizne efemeride ter datoteko s popravki ure satelita in sprejemnika. Pod nastavitvami lahko spreminjamo način izmere, višinski kot, interval registracije signala, čas trajanja opazovanj, popravke ionosfere in troposfere, obdelavo v obe smeri ter način filtriranja opazovanj.

Rezultati obdelave so v datumu WGS84. Izpis koordinat se lahko spreminja znotraj programa, možne so rešitve v (RTKLIB, 2017):

- elipsoidnih koordinatah; φ, λ, h ,
- kartezičnih koordinatah; X, Y, Z v ECEF (angl. Earth Centered, Earth Fixed) koordinatnem sestavu,
- ravninskih koordinatah; E, N, U baseline solution,
- obliki NMEA0183; *PVT* (position, velocity, time) oz. (položaj, hitrost, čas).

Rezultati so zbrani v .pos datoteki, ki vsebuje časovne položaje točk z natančnostmi v horizontalni in vertikalni smeri. Datoteko uporabimo za grafično obdelavo s programom RTKPLOT. Dobljene koordinate točk lahko izvozimo v kml datoteko in jih predstavimo s programom Google Earth.

4 RAZISKAVA

V prejšnjih poglavjih smo opisali teoretična izhodišča metode PPP, navedli njene prednosti in slabosti, predstavili vplive na opazovanja in opisali programsko opremo, ki se lahko uporabi za obdelavo in analizo meritev GNSS. S praktičnim preizkusom v kinematičnem načinu želimo ugotoviti, kakšni pogoji morajo biti izpolnjeni in kakšna je praktično dosegljiva kakovost koordinat, določenih z metodo PPP v kinematičnem načinu. Za namen raziskave smo izvedli meritve na strehi stavbe Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi cesti 2. Meritve smo izvedli 10. 5. 2017. Opravili smo opazovanja signala sistemov GPS in GLONASS.

4.1 Merski instrumentarij



Slika 9: Merski instrumentarij
(Vir: Simon Šanca)

Za potrebe naše raziskave smo uporabili naslednjo mersko opremo:

- GNSS sprejemnik Leica Viva GS15,
- elektronski tahimeter Leica Geosystems TCRP1201+,
- dlančnik Leica Viva GS15,
- 360° prizmo Leica,
- žepni merski trak Leica,
- togo grezilo.

4.2 Delovišče

Naše delovišče je bila streha stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi cesti 2 v Ljubljani. Streho fakultete smo izbrali zaradi več dejavnikov. Višina stavbe omogoča neoviran sprejem signala GNSS, nadstrešek na zahodni strani strehe omogoča izgubo signala med kinematično izmero. Znana položaja obeh stebrov FGG2 in FGG4 sta omogočila kvalitetno primerjavo dobljenih rezultatov. Streha Fakultete za gradbeništvo in geodezijo ni optimalno delovišče, saj pločevinast nadstrešek in železna ograja predstavljata izvor večpotja. Izvedba meritev v mestu ali v bližini dreves bi vpliv večpotja in izgube signala dodatno povečala, zato se za potrebe te diplomske naloge nismo odločili za izvedbo takih meritev. Vsekakor bi bila zanimiva izvedba kinematične metode PPP v urbanih območjih.

Kot rečeno, smo opravili opazovanja sistemov GPS in GLONASS in sicer na geodetskih stebrih FGG2 in FGG4. Stojišče tahimetra je predstavljal steber FGG1, vse tahimetrične meritve so izhajale iz stebra FGG1. GNSS sprejemnik smo najprej dvakrat postavili na steber FGG2 in potem dvakrat na steber FGG4. Koordinate stebrov so podane v spodnji preglednici.

Preglednica 1: Koordinate stebrov v državnem koordinatnem sistemu D96/TM s pripadajočimi ortometričnimi in elipsoidnimi višinami

Točka	e [m]	n [m]	H [m]	h [m]
FGG1	460.878,787	100.784,216	321,115	367,531
FGG2	460.938,078	100.811,610	321,116	367,527
FGG4	460.888,291	100.763,788	321,110	367,525



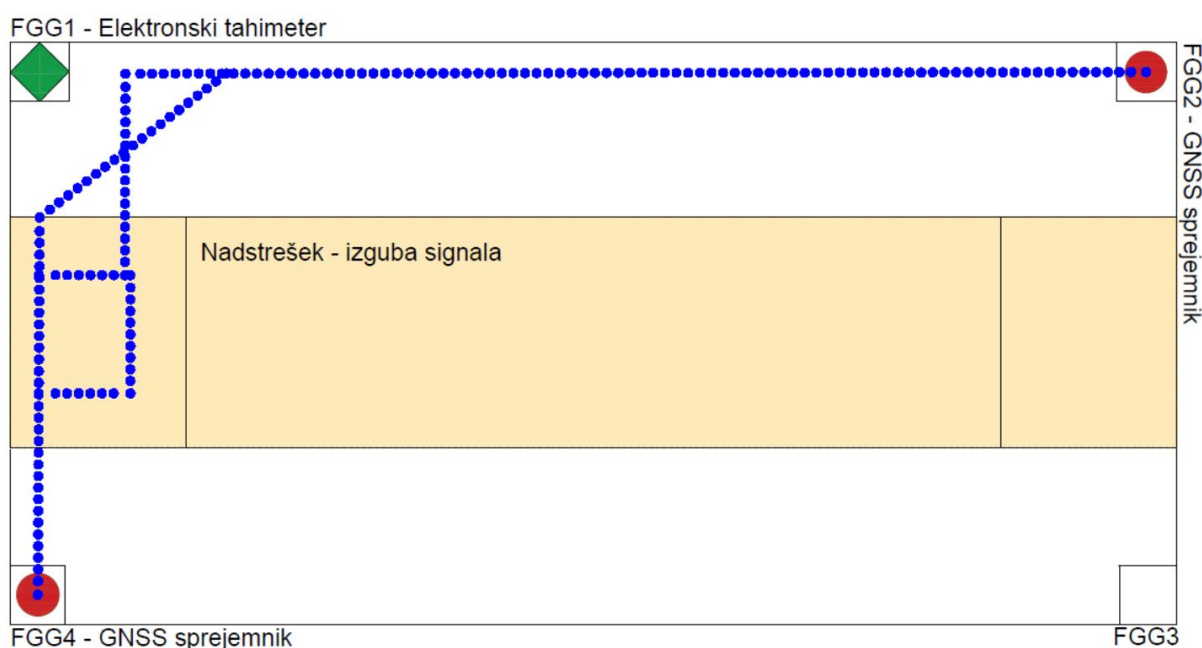
Slika 10: Postavitev elektronskega tahimetra Leica TCRP1201+ na stebru FGG1
(Vir: Simon Šanca)



Slika 11: Postavitev GNSS sprejemnika s 360°prizmo na stebru FGG2
(Vir: Simon Šanca)

4.3 Načrt izvedbe meritev

Za kakovostno izmero potrebujemo kakovosten načrt izmere, ki ga shematsko predstavlja spodnja skica. Med izmero smo opravili štiri serije kinematičnih meritev. Pred vsako serijo kinematičnih meritev smo izvedli enourno statično izmero, ki je potrebna za inicializacijo GNSS sprejemnika pred izvedbo kinematičnih meritev. Zanimala nas je namreč kakovost koordinat v načinu kinematični PPP, določenih na prostem ter tudi kakovost izračunanih položajev po izgubi signala. Zato smo se med premikom od enega stebra do drugega (modra pikčasta linija) sprehodili pod nadstreškom, ki se nahaja na zahodni strani strehe med točkama FGG1 in FGG4. Sprejem signala pod nadstreškom ni bil mogoč oziroma je bil zelo oviran. Po vrnitvi na območje neoviranega sprejema signala GNSS smo ponovno sprejemali signal in se sprehodili do stebra, na katerem smo končali serijo kinematične izmere. Z izmero smo začeli na stebru FGG2, kamor smo najprej postavili GNSS sprejemnik, kot kaže spodnja slika. Po drugi seriji kinematičnih opazovanj smo isti GNSS sprejemnik prestavili na steber FGG4. Sprejemnik je bil tako postavljen dvakrat na stebru FGG2 in dvakrat na stebru FGG4.



Slika 12: Skica izmere
(Vir: AutoCAD 2016)

4.4 Izvedba meritev z GNSS in kontrolnih tahimetričnih meritev

Z meritvami smo začeli 10. 5. 2017 ob 8.30 po lokalnem času. Na steber FGG1 smo postavili elektronski tahimeter Leica Geosystems TCRP1201+, ga centriral in horizontalizirali ter izmerili višino instrumenta. Tahimeter smo uporabili za sledenje 360° prizmi, ki je bila skupaj z GNSS sprejemnikom nameščena na togo grezilo. Meritve smo začeli na stebru FGG2, kamor smo postavili GNSS sprejemnik in začeli z enourno statično izmero, ki smo jo uporabili za inicializacijo oziroma za določitev neznanega števila celih valov. Po končani prvi seriji statične izmere smo začeli s kinematično izmero. Pred začetkom kinematične izmere smo nastavili elektronski tahimeter na avtomatsko sledenje 360° prizme, za ta namen smo uporabili sistem SmartPole, ki omogoča avtomatsko sledenje prizme. Koordinate prizme beleži v nastavljenem časovnem intervalu. Za interval registracije GNSS-izmere smo izbrali interval registracije 1 sekunde, za beleženje koordinat z načinom Smartpole interval 0,2 sekunde. Isti sprejemnik, kot smo ga uporabili za statično izmero, smo pritrdili na togo grezilo s 360° prizmo in se sprehodili od stebra

FGG2 do stebra FGG1, ter pravokotno do stebra FGG4. Med izmero smo se premikali pod nadstreškom na zahodni strani strehe fakultete, kjer sprejem signala ni bil mogoč. Nato smo zapustili območje pod nadstreškom in se vrnili na odprto območje ter nadaljevali meritve do izhodiščnega stebra FGG2. GNSS sprejemnik smo pritrdili na steber FGG2 in eno uro izvajali statično izmero. Način SmartPole smo ponovno uporabili pri drugi seriji kinematičnih meritev, ki smo jih izvedli z začetkom ob 11.05. Po enaki poti smo se sprehodili od stebra FGG2 do stebra FGG4. Med izmero smo se znova premikali pod nadstreškom, kjer smo izgubili sprejem signala. Meritve druge serije smo zaključili na stebru FGG4, na katerem smo znova izvedli enourno statično izmero. Tretjo serijo meritev smo izvedli z začetkom ob 12.25. Začeli smo na stebru FGG4 in opravljali kinematične meritve do stebra FGG2 ter nazaj do stebra FGG4. Sprejem signala se je med izmero dvakrat izgubil, pri prvem sprehodu pod nadstreškom in pri drugem. Serijo smo zaključili na stebru FGG4, kjer smo znova izvedli enourno statično izmero. Četrto serijo kinematičnih meritev smo izvedli z začetkom ob 13.35. Na začetku izmere smo izgubili stik s tahimetrom, zato smo s tahimetrom ročno navizirali na 360° prizmo in ponovno začeli slediti prizmi. Pri četrti seriji smo enako kot pri tretji začeli na stebru FGG4 in se sprehodili do stebra FGG2 in nazaj do stebra FGG4. Sprejem signala se je med izmero znova dvakrat izgubil. Meritve smo končali ob 13.45.



Slika 13: Izmera pod streho
(Vir: Simon Šanca)

Na osnovi kombinacije kinematičnih in statičnih meritev, potrebnih za inicializacijo ter za določitev neznanega števila celih valov smo kot rezultate dobili dva niza koordinat določenih v dveh različnih koordinatnih sistemih z različnima načinoma izmere. V nadaljevanju bomo koordinate določene z elektronskim tahimetrom uporabili kot referenčne koordinate za analizo pridobljenih GNSS koordinat. Meritve z GNSS smo obdelali s programsko opremo CSRS-PPP, APPS, GAPS, magicGNSS, gLAB in RTKLIB. Programsko opremo, ki smo jo uporabili za obdelavo meritev, smo podrobneje predstavili v poglavju 3.

5 REZULTATI OBDELAVE IN ANALIZE MERITEV

5.1 Rezultati obdelave meritev s programsko opremo PPP

Meritve smo obdelali s štirimi spletnimi programi PPP, in sicer: CSRS-PPP, GAPS, APPS in magicGNSS ter z dvema samostojnima programoma gLAB in RTKLIB. Pri vseh načinih obdelave smo uporabili precizne efemeride (.sp3), 30-sekundne precizne popravke ur (.clk30) satelitov in sprejemnika in podatke o absolutni kalibraciji anten satelitov in sprejemnikov (.atx). Spletne aplikacije PPP so podatke za obdelavo pridobile same, pri gLAB in RTKLIB smo podatke pridobili sami s spletne strani IGS. Pri RTKLIB smo uporabili še RINEX navigacijsko datoteko, ki smo jo pridobili preko omrežja SIGNAL. S spletno storitvijo GAPS nismo pridobili rezultatov, ker ne omogoča sočasno uporabo satelitov GPS in GLONASS. V dokumentaciji programa je navedeno, da omogoča le obdelavo z GPS. Obdelali smo samo opazovanj satelitov GPS, vendar neuspešno. Na našo elektronsko pošto niso odgovorili, zato smo GAPS v nadaljevanju izločili iz raziskave.

Obdelava spletnih storitev poteka s pošiljanjem RINEX datoteke z opazovanji preko elektronskega naslova ali z nalaganjem preko spleta, odvisno od storitve. Obdelava z gLAB in RTKLIB z uporabo grafičnega uporabniškega vmesnika programa. Rezultate spletnih storitev dobimo na elektronski naslov, rezultate gLAB in RTKLIB neposredno na disk.

Ker smo uporabili interval registracije 1 s, kar je pri kinematičnih meritvah nujen pogoj, smo skupaj pridobili več kot 18000 položajev za štiri statične izmere in štiri kinematične izmere. Manj položajev smo dobili z gLAB, ker program ne omogoča obdelave opazovanj za vsako sekundo. Minimalni interval obdelave znaša 30 s. Zato smo pri gLAB dobili samo 1220 položajev merjenih točk, od tega samo 51 položajev kinematičnih meritev. APPS ni obdelal tretje in četrte serije kinematične izmere, zato upoštevamo le prvi dve seriji pri APPS.

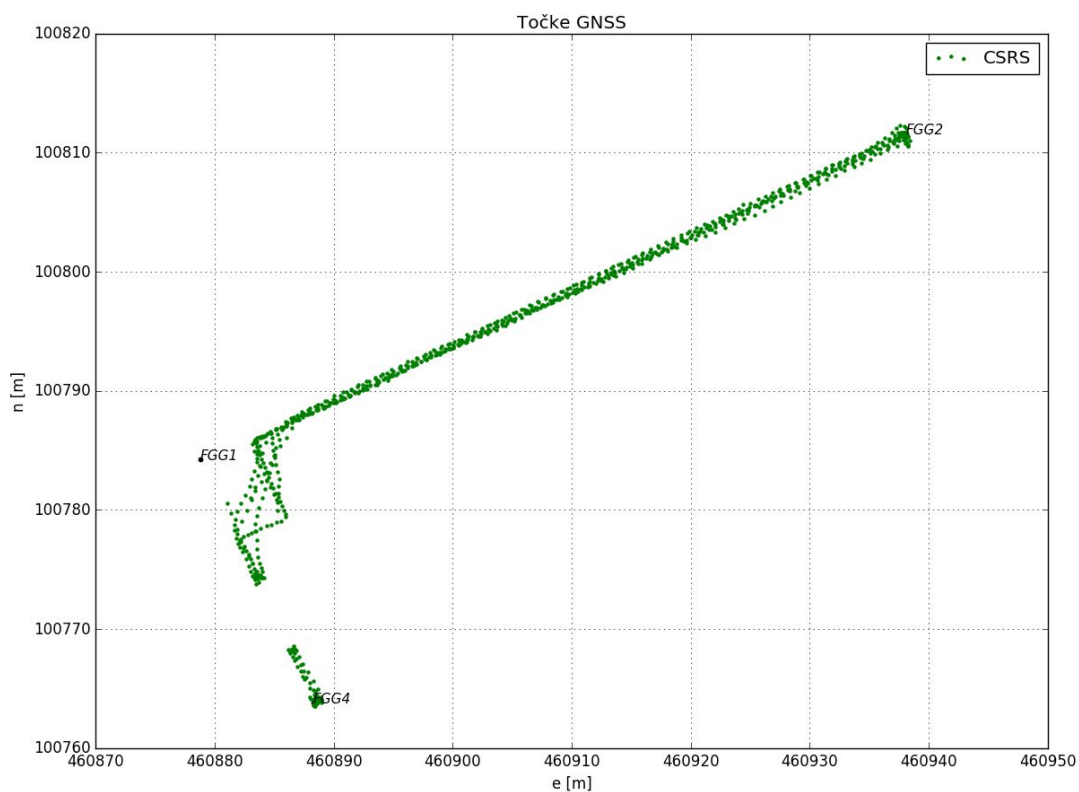
Izračunani položaji točk so podani v geodetskih koordinatah (φ, λ, h) , v koordinatnem sistemu ITRF, pri RTKLIB v WGS84, zato smo za nadaljnjo obdelavo vse točke transformirali v državni koordinatni sistem D96/TM (e, n, H) . Ker program SitraNet sprejema le 50 kB datoteke, bi bila pretvorba koordinat zamudna, zato smo transformacijo koordinat izvedli s programom CrdCon.exe, to je konzolni program za pretvorbo koordinat med kartezičnimi, geodetskimi, projekcijskimi in lokalnimi (LG) koordinatami, avtorja Oskarja Sterleta. Program ne vsebuje model geoida za izračun ortometričnih višin. Ortometrične višine točk smo izračunali s programom SitraNet. Velikost vhodnih datotek za pretvorbo smo zmanjšali z izračunom splošnih aritmetičnih sredin statičnih opazovanj. Izračunane splošne aritmetične sredine predstavljajo končne koordinate statičnih opazovanj stebrov.

Koordinate v državnem koordinatnem sistemu D96/TM smo uporabili za nadaljnje izračune. Sestavili smo tri tekstovne datoteke s koordinatami za spletne storitve (*csrs.txt*, *apps.txt*, *magic.txt*) in dve tekstovni datoteki za gLAB in RTKLIB (*glab.txt* in *rtklib.txt*) s statičnimi in kinematičnimi položaji točk. Zaradi lažje primerjave koordinat smo celotno datoteko meritev razdelili glede na število serij kinematičnih izmer, kjer vsaka tekstovna datoteka predstavlja eno serijo kinematične izmere. Koordinate stebrov s statično izmero so predstavljene v spodnji preglednici.

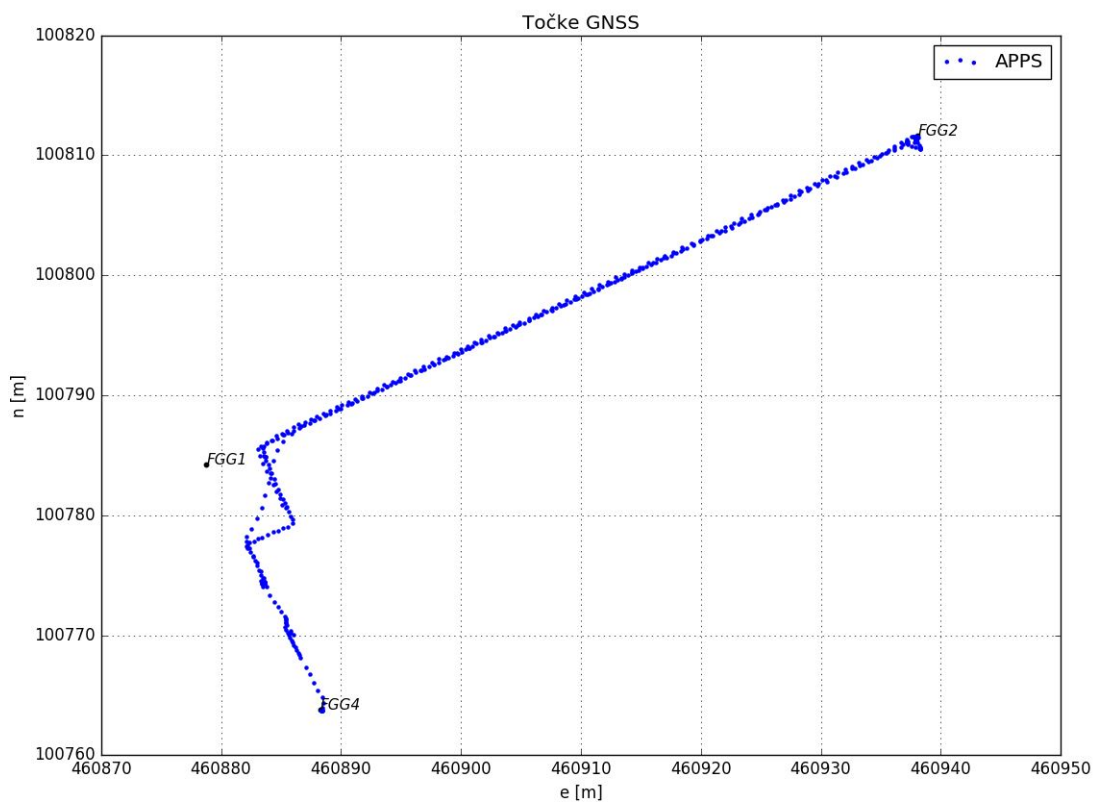
Preglednica 2: Koordinate merjenih stebrov s statično metodo PPP v državnem koordinatnem sistemu D96/TM z ortometričnimi in elipsoidnimi višinami

Točka	Serijska	e [m]	n [m]	H [m]	h [m]
CSRS					
FGG2	1	460.938,657	100.812,151	319,422	365,837
FGG2	2	460.938,617	100.812,212	319,351	365,766
FGG4	3	460.888,874	100.764,313	319,400	365,815
FGG4	4	460.888,887	100.764,309	319,397	365,812
APPS					
FGG2	1	460.938,644	100.812,150	321,420	367,835
FGG2	2	460.938,621	100.812,137	321,374	367,853
FGG4	3	460.888,849	100.764,317	321,346	367,761
magicGNSS					
FGG2	1	460.938,701	100.812,232	319,342	365,757
FGG2	2	460.938,593	100.812,138	319,437	365,852
FGG4	3	460.888,839	100.764,298	319,427	365,842
FGG4	4	460.888,902	100.764,304	319,383	365,779
gLAB					
FGG2	1	460.938,652	100.812,186	319,396	365,817
FGG2	2	460.938,577	100.812,141	319,421	365,820
FGG4	3	460.888,837	100.764,268	319,549	365,927
FGG4	4	460.888,639	100.764,258	319,442	365,934
RTKLIB					
FGG2	1	460.938,592	100.812,091	321,406	367,822
FGG2	2	460.938,199	100.812,161	321,393	367,808
FGG4	3	460.887,868	100.764,140	322,253	368,668
FGG4	4	460.887,837	100.764,145	321,117	367,532

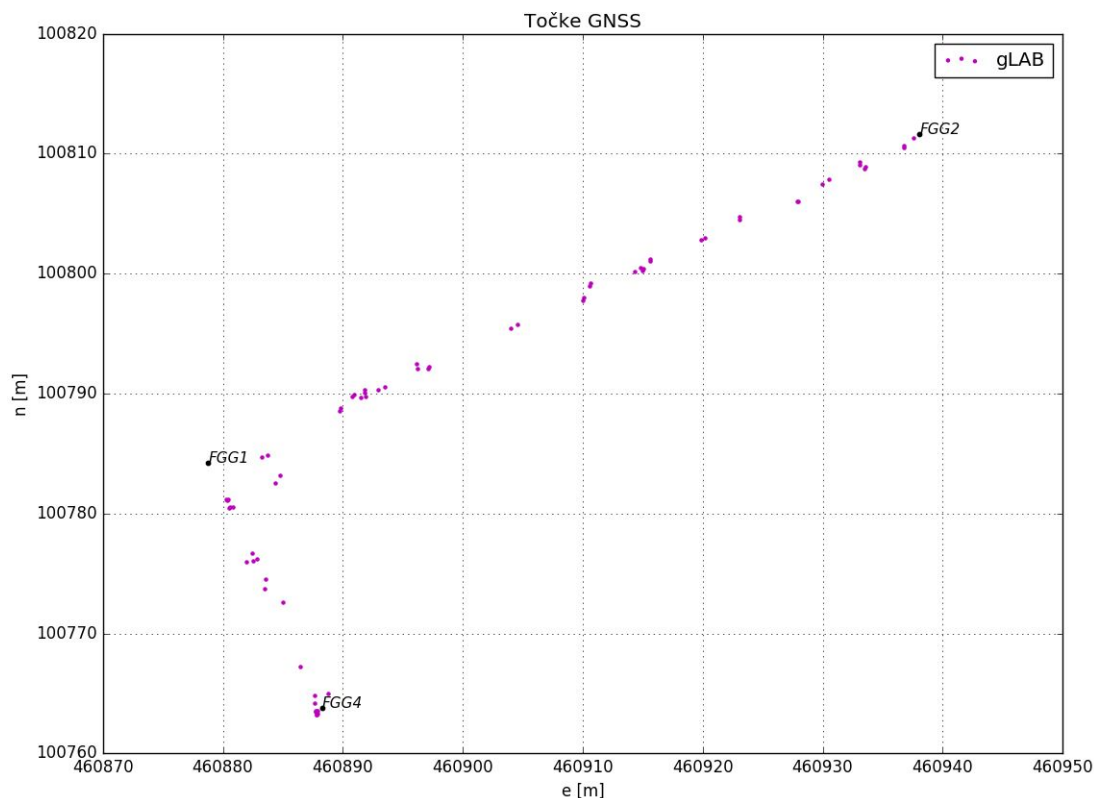
Grafični izris vsebuje že programska oprema za obdelavo, vendar dobljene koordinate GNSS-izmere niso usklajene s koordinatami tahimetrične izmere. Uskladitev koordinat je opisana v poglavju 5.3. Za kasnejšo primerjavo položajev točk tahimetra in GNSS sprejemnika smo položaj točk grafično predstavili sami. Za grafični izris smo uporabili knjižnico Matplotlib programskega jezika Python 3.5. Programi CSRS-PPP, magicGNSS in RTKLIB so vrnil približno enako število kinematičnih položajev točk, zato izrisujemo samo položaje CSRS-PPP. Programa APPS in gLAB sta vrnila manj rezultatov, zato položaje točk izrisujemo posebej za oba.



Slika 14: Položaji CSRS-PPP
(Vir: Spyder (Python 3.5))



Slika 15: Položaji APPS
(Vir: Spyder (Python 3.5))



Slika 16: Položaji gLAB
(Vir: Spyder (Python 3.5))

5.2 Določitev referenčnih koordinat s tahimetrom

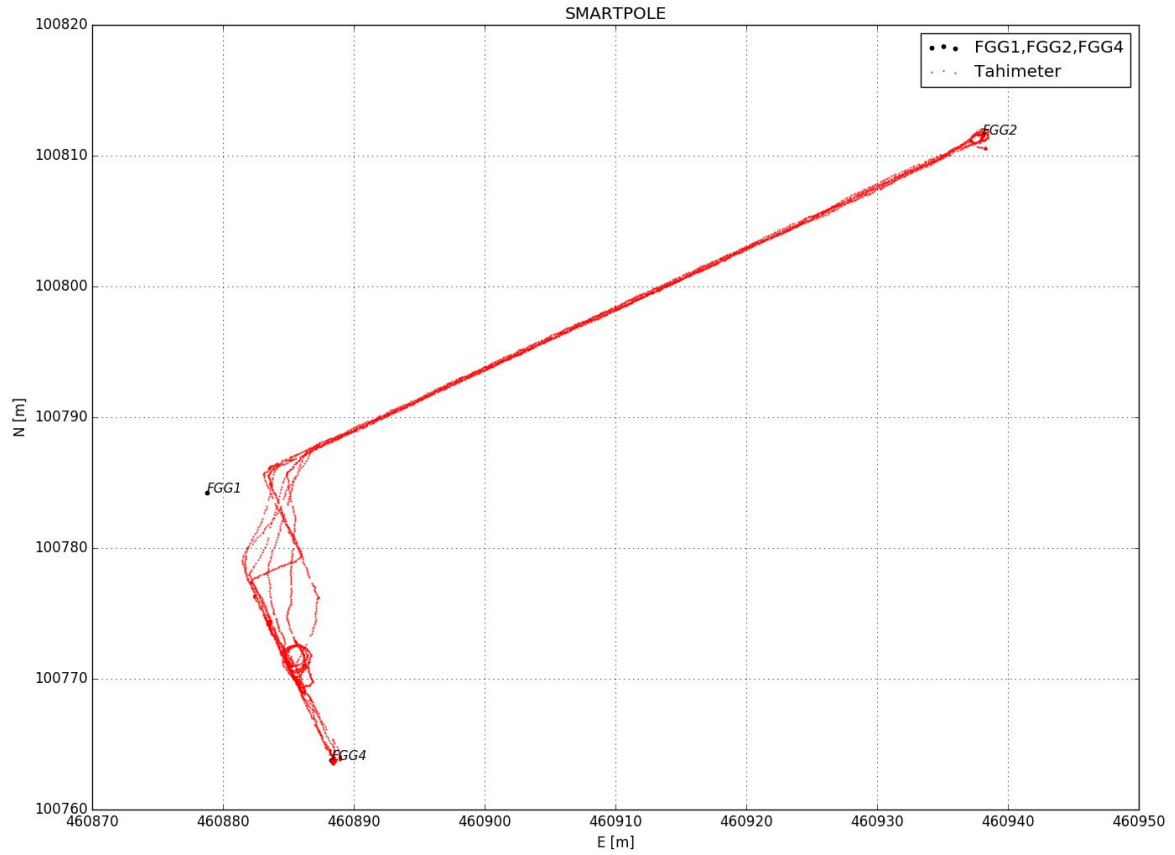
S tahimetrom smo določili vse točke v koordinatnem sistemu D96/TM (e, n, H). Med kinematično izmero je bilo posnetih 4417 točk. Ker točke tahimetrične izmere niso bile orientirane iz stojišča FGG1 na steber FGG2, smo vse vrednosti koordinat točk transformirali z rotacijsko transformacijo za smerni kot med stebroma FGG1 in FGG2 (ν_{FGG1}^{FGG2}). Postopek smo izvedli z rotacijo v 2D prostoru z uporabo rotacijske matrike R . V prvem koraku smo izračunali smerni kot med stebroma FGG1 in FGG2:

$$\nu_{FGG1}^{FGG2} = \arctan\left(\frac{\Delta e}{\Delta n}\right) = \arctan\left(\frac{e_{FGG2} - e_{FGG1}}{n_{FGG2} - n_{FGG1}}\right) = 65^\circ 20' 18'' \quad (4)$$

V nadaljevanju smo izvedli rotacijo okoli središčne točke FGG1 v smeri urinega kazalca za smerni kot ν_{FGG1}^{FGG2} . Koordinate rotiranih točk (e_2, n_2) dobimo z množenjem rotacijske matrike R in merjenih točk tahimetra (e_1, n_1):

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\nu_{FGG1}^{FGG2}) & \sin(\nu_{FGG1}^{FGG2}) \\ -\sin(\nu_{FGG1}^{FGG2}) & \cos(\nu_{FGG1}^{FGG2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ n_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Z matričnim množenjem dobimo končni enačbi za izračun položajev točk. V nadaljevanju smo tahimetrično določenim višinam prišteli popravek višine 360° prizme, ki znaša 5,9 cm. Tako smo višine tahimetra preračunali na referenčno točko antene GNSS. Na koncu smo uporabili knjižnico Matplotlib in grafično predstavili točke referenčne tahimetrične izmere, kar prikazuje spodnja slika.



Slika 17: Točke izmerjene s tahimetrom
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Zgornja slika predstavlja izmerjene točke vseh štirih serij kinematičnih meritev s tahimerom. V nadaljevanju smo primerjali kinematične meritve PPP z merjenimi točkami tahimetrične izmere.

5.3 Primerjava koordinat določenih s PPP GNSS in tahimetrije

Rezultati obdelave meritev z GNSS so pridobljeni v drugem koordinatnem sistemu kot meritve s tahimetrom, zato koordinat točk neposredno ne moremo primerjati med sabo, ker ne vemo na katero točko se nanašajo koordinate določene z GNSS. predstavlja enakovredno tahimetrično točko. Problem predstavlja tudi neuskkljenost med koordinatnima sistemoma tahimetričnih meritev in meritev z GNSS. Neuskkljenost med koordinatnima sistemoma tahimetrično izmerjenih točk in točk izmerjenih z GNSS smo rešili z izračunom razlik koordinat med geodetskima stebroma FGG2 in FGG4 z znanimi koordinatami v D96/TM (T_{FGG2} , T_{FGG4}) in med merjenima stebroma (G_{FGG2} , G_{FGG4}), koordinate katerih smo pridobili z enournimi statičnimi meritvami pred izvedbo kinematičnih meritev. Položaja stebrov T_{FGG2} in T_{FGG4} poznamo:

$$T_{FGG2} = \begin{bmatrix} e_{FGG2} \\ n_{FGG2} \\ H_{FGG2} \end{bmatrix} \text{ in } T_{FGG4} = \begin{bmatrix} e_{FGG4} \\ n_{FGG4} \\ H_{FGG4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Položaja stebrov G_{FGG2} in G_{FGG4} sta merjena s statično metodo PPP ter izračunana iz splošnih aritmetičnih sredin meritev statičnih opazovanj:

$$G_{FGG2} = \begin{bmatrix} e_{FGG2} \\ n_{FGG2} \\ H_{FGG2} \end{bmatrix} \text{ in } G_{FGG4} = \begin{bmatrix} e_{FGG4} \\ n_{FGG4} \\ H_{FGG4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

V nadaljevanju računamo razliko položajev Δ med geodetskima stebroma z znanimi koordinatami (T_{FGG2} , T_{FGG4}) in med merjenima stebroma z GNSS (G_{FGG2} , G_{FGG4}). Za uskladitev koordinat prve in druge serije kinematične izmere uporabimo steber FGG2, za uskladitev tretje in četrte serije kinematične izmere steber FGG4. Razliko položajev Δ dobimo:

$$\begin{aligned}\Delta_{FGG2} &= G_{FGG2} - T_{FGG2} = \begin{bmatrix} e_{FGG2} - e_{FGG2} \\ n_{FGG2} - n_{FGG2} \\ H_{FGG2} - H_{FGG2} \end{bmatrix} \\ \Delta_{FGG4} &= G_{FGG4} - T_{FGG4} = \begin{bmatrix} e_{FGG4} - e_{FGG4} \\ n_{FGG4} - n_{FGG4} \\ H_{FGG4} - H_{FGG4} \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{8}$$

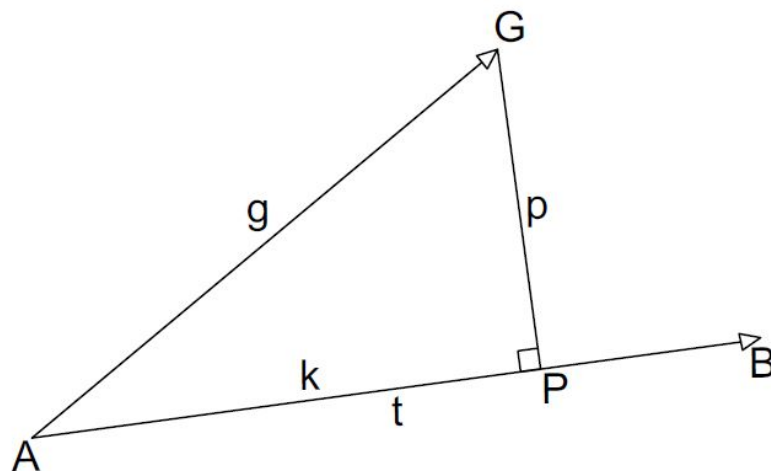
Neusklajenost med koordinatnima sistemoma tahimetričnih meritev in meritev GNSS odpravimo z razliko koordinat GNSS (G_M) in razliko položajev stebrov (Δ). Uskladitev koordinat izvedemo dvakrat z uporabo stebra FGG2 (1. in 2. serija) in dvakrat z uporabo stebra FGG4 (3. in 4. serija).

$$\begin{aligned}G_U &= G_M - \Delta_{FGG2} = \begin{bmatrix} e_M - \Delta_{FGG2} \\ n_M - \Delta_{FGG2} \\ H_M - \Delta_{FGG2} \end{bmatrix} \\ G_U &= G_M - \Delta_{FGG4} = \begin{bmatrix} e_M - \Delta_{FGG4} \\ n_M - \Delta_{FGG4} \\ H_M - \Delta_{FGG4} \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{9}$$

Rezultati so usklajene koordinate GNSS (G_U) za vse štiri serije kinematičnih in statičnih opazovanj. Sedaj lahko opravimo analizo med razlikami koordinat točk na poti, ki jih dobimo na osnovi opazovanj GNSS določenih v kinematičnem načinu PPP in s tahimetričnimi opazovanji, ki predstavljajo referenčne točke za primerjavo opazovanj GNSS. Za analizo razlik med oblikami poti smo izdelali lastno programsko rešitev v programskem jeziku Python.

5.3.1 Primerjava horizontalnih koordinat

Koordinate tahimetrične izmere in GNSS-izmere so dobljene v različnih koordinatnih in časovnih sistemih, zato jih neposredno ne moremo primerjati med seboj, ker ne vemo, katera GNSS točka predstavlja pripadajočo tahimetrično točko, ki smo ji določili koordinate s tahimetrično izmero. Število tahimetrično določenih točk je večje od števila točk določenih z GNSS, zato enolična primerjava ni možna, primerjamo razlike med oblikami poti kinematičnih GNSS-izmer in izmer s tahimetrom. Rezultati primerjave so odstopanja med najbližjimi pravokotnimi projekcijami GNSS točk glede na z daljicami povezane koordinate točk določenih s tahimetrično izmero, ki predstavljajo referenčne točke za primerjavo koordinat. Mera kakovosti je tako razlika med oblikami poti, določenih na osnovi opazovanj GNSS in na osnovi opazovanj tahimetra in ne razlika med absolutnimi položaji točk na poti.



Slika 18: Skica primerjave položajev GNSS in tahimetra
(Vir: AutoCAD 2016)

Vektor $\vec{AB}$ predstavlja daljico med trenutno (A) in naslednjo (B) točko tahimetrične izmere. Vektor $\vec{AG}$ predstavlja daljico med trenutno točko tahimetrične izmere (A) in med točko GNSS-izmere (G), ki se primerja glede na vektor $\vec{AB}$ oz. glede na daljico med točkama določenima s tahimetrično izmero. Zanima nas pravokotna razdalja (p) od točke G do vektorja $\vec{AB}$ oz. do točke P . Pravokotna razdalja p predstavlja razliko med oblikami poti tahimetrične in GNSS-izmere. Točka P predstavlja točko sečišča vektorja $\vec{AB}$ in pravokotnice na $\vec{AB}$, ki poteka skozi točko G . Razlike med oblikami poti tahimetričnih (A, B) in GNSS (A, G) točk izpeljemo z enačbami vektorske analize v ravnini. Iščemo pravokotno projekcijo točke G na vektor $\vec{AB}$. V prvem koraku izračunamo razliko položajev med točkama B in A ter G in A nato dolžino vektorjev $\vec{t}$ in $\vec{g}$.

$$\begin{aligned} t = B - A &\Rightarrow \|\vec{t}\| = \sqrt{\vec{t} \cdot \vec{t}} \\ g = G - A &\Rightarrow \|\vec{g}\| = \sqrt{\vec{g} \cdot \vec{g}} \end{aligned} \quad (10)$$

Sledi izračun oddaljenosti točke pravokotne projekcije P od točke A . Razdaljo med A in P označimo s k , ki nam pove kako daleč od točke A se nahaja točka P . Razdaljo k in koordinate točke P izračunamo iz enačb:

$$k = \frac{\vec{g} \cdot \vec{t}}{\|\vec{t}\|^2} \quad \text{in} \quad P = A + k \cdot \vec{t} = A + \frac{\vec{g} \cdot \vec{t}}{\|\vec{t}\|^2} \cdot \vec{t} \Rightarrow P = A + \frac{\vec{g} \cdot \vec{t}^2}{\|\vec{t}\|^2} \quad (11)$$

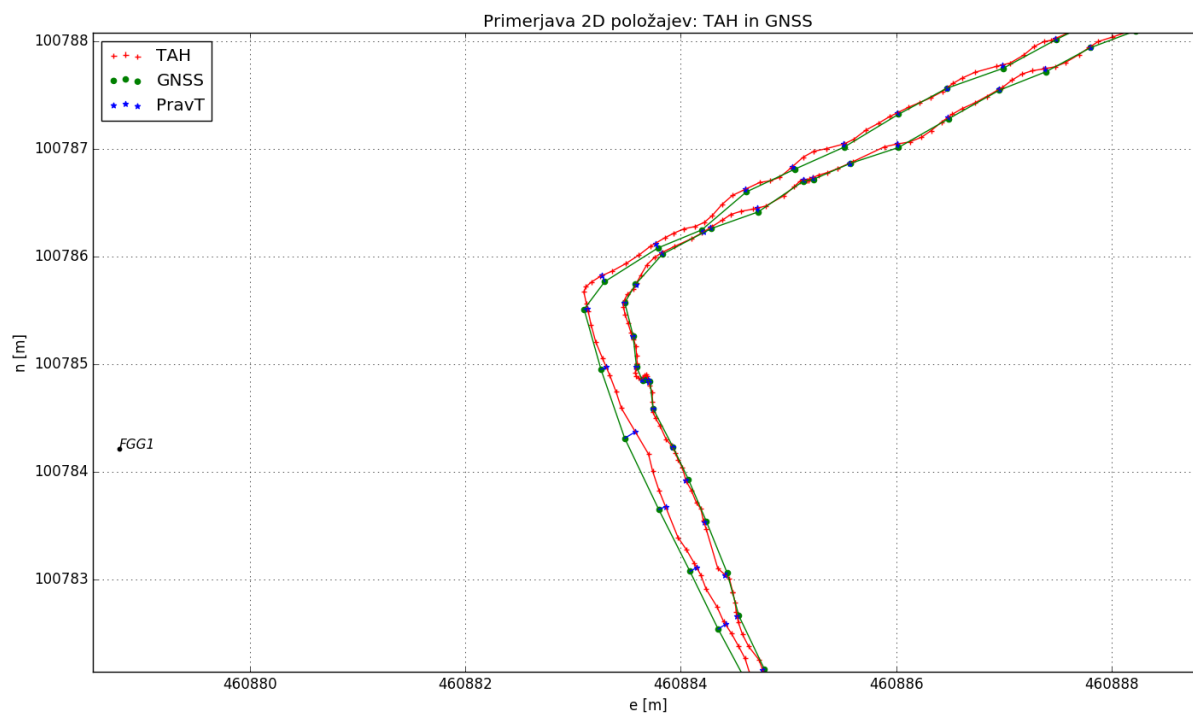
Zanima nas še dolžina pravokotne projekcije G na $\vec{AB}$, ki jo dobimo kot razliko med G in P .

$$p = G - P \Rightarrow \|\vec{p}\| = \sqrt{\vec{p} \cdot \vec{p}} \quad (12)$$

Izračunana dolžina p predstavlja razliko med oblikami poti GNSS-izmere in referenčne tahimetrične izmere. S programom izračunamo točko pravokotnice P in dolžino pravokotnice p za vsako kinematično točko GNSS glede na referenčno tahimetrično izmero.

Rezultati so:

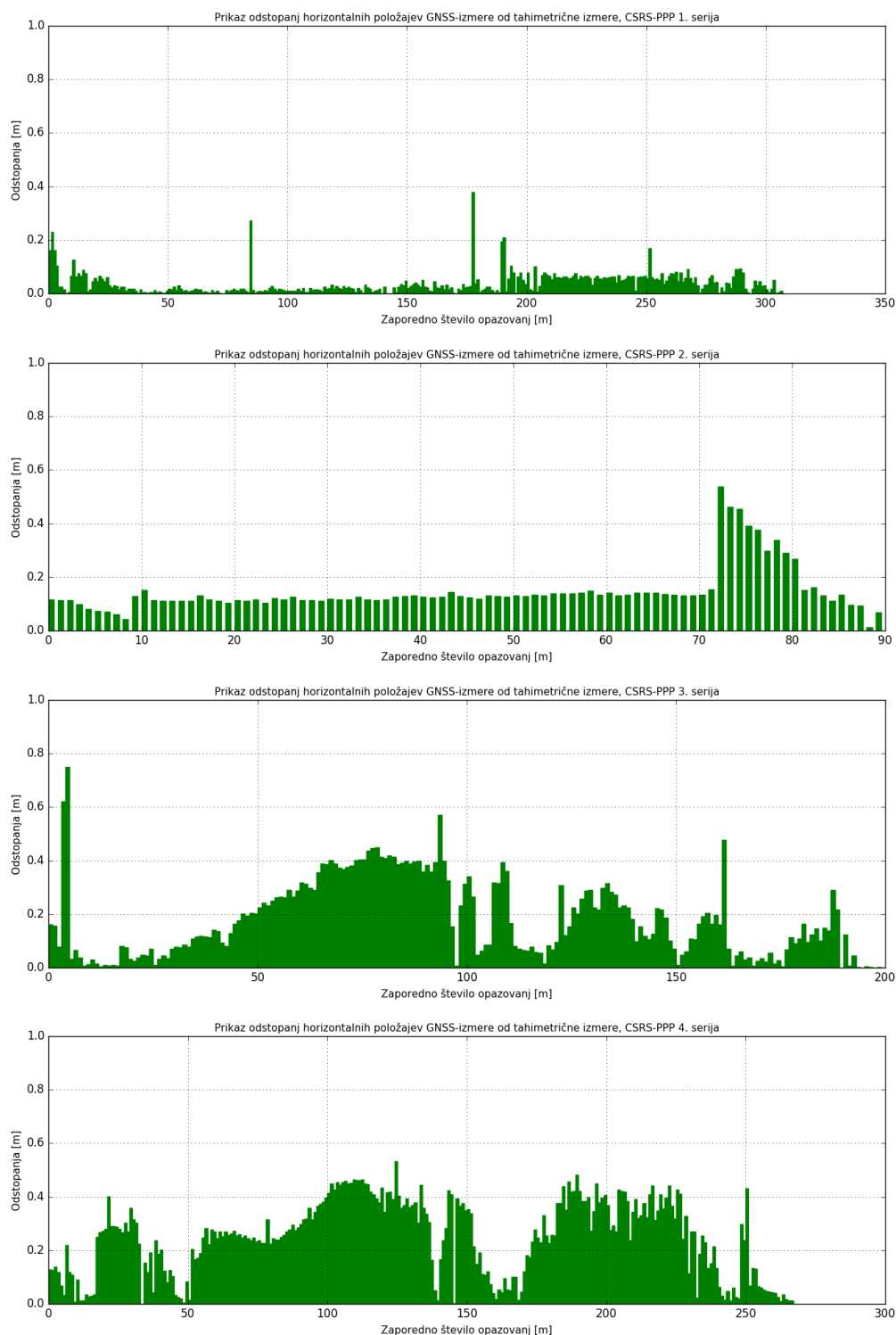
- koordinate točk tahimetra $A(e, n, H)$ in $B(e, n, H)$,
- pripadajoče koordinate točk GNSS-izmere $G(e, n, H)$,
- koordinate točk $P(e, n, H)$,
- dolžine pravokotnic p med $\vec{AB}$ in $\vec{AG}$.



Slika 19: Primerjava horizontalnih položajev s programom
(Vir: Spyder (Python 3.5))

V poglavju 5.4 predstavljamo osnovne numerične statistike za razlike med oblikami poti za vsako serijo kinematičnih GNSS-izmer. Spodnji grafi prikazujejo odstopanja horizontalnih položajev od referenčnih tahimetričnih položajev za CSRS-PPP, APPS, magicGNSS, gLAB in RTKLIB v času kinematične izmere.

CSRS-PPP

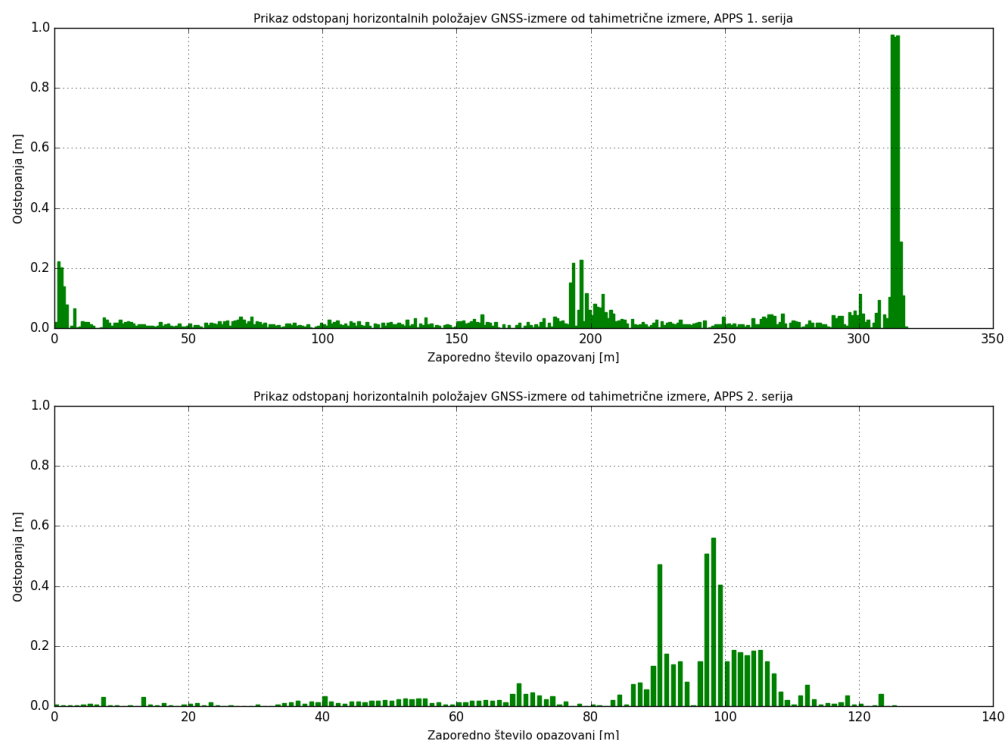


Slika 20: Odstopanja horizontalnih položajev CSRS-PPP po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Pri obdelavi opazovanj s spletnim programom CSRS-PPP dobimo najmanjša odstopanja horizontalnih položajev pri prvi in drugi seriji meritev. Razlike med oblikami poti GNSS-izmere in tahimetrične izmere so v povprečju manjše od 20 centimetrov v prvi in drugi seriji. Grafa prve in druge serije izmere sta si podobna. Na začetku izmere so vrednosti odstopanj manjše od 20 centimetrov, po izgubi sprejema signala se povečajo do 60 centimetrov in se potem z nadaljeva-

njem kinematičnih meritev počasi manjšajo. Odstopanja horizontalnih položajev tretje in četrte serije so večja, v povprečju pa so manjša od 50 centimetrov. Razlog za to je takojšnja izguba signala na začetku posamezne kinematične izmere. Izguba signala na začetku izmere občutno poslabša natančnost koordinat merjenih točk. Z nadaljevanjem meritev se odstopanja zmanjšajo in ob ponovni izgubi sprejema signala znova povečajo. Lahko potrdimo, da sta tretja in četrta serija izmere slabše kakovosti kot prva in druga serija izmere.

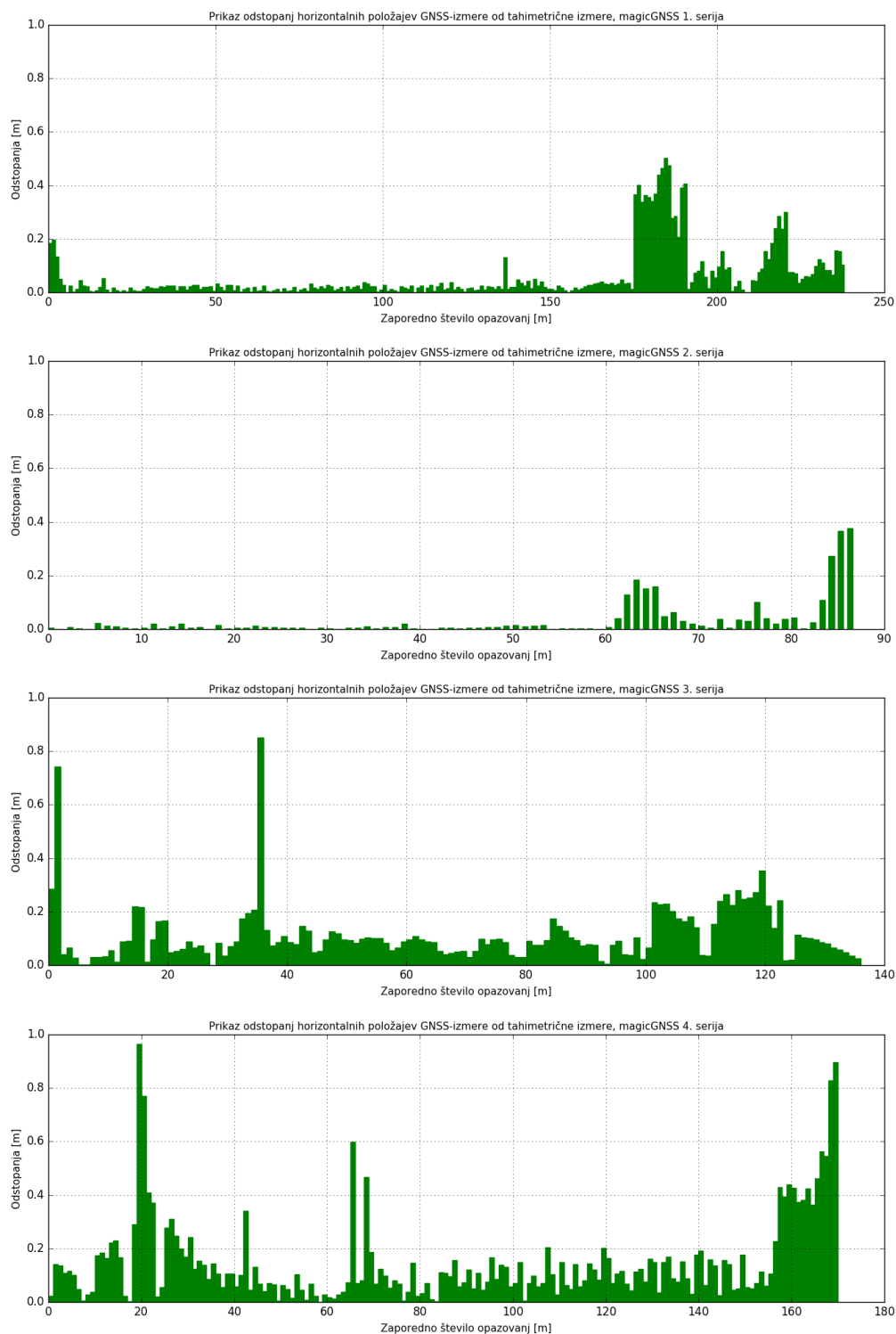
APPS



Slika 21: Odstopanja horizontalnih položajev APPS po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Ker je programski paket APPS obdelal le prvo in drugo serijo kinematičnih meritev, prikazujemo le dva grafa za spletno aplikacijo. Odstopanja horizontalnih položajev so najmanjša pri drugi seriji meritev. Do izgube sprejema signala so odstopanja podobna in so manjša od 10 centimetrov. Večja so odstopanja pri prvi seriji meritev. Skoraj vsa odstopanja so do izgube signala manjša ali enaka 10 centimetrom. Z izgubo signala se točnost merjenih položajev občutno poslabša. Odstopanja horizontalnih položajev po izgubi signala znašajo skoraj en meter pri prvi seriji izmere in približno 60 centimetrov pri drugi seriji izmere. Ob ponovnem sprejemu signala se odstopanja počasi manjšajo in dosežejo vrednosti pod 20 centimetrom.

MagicGNSS

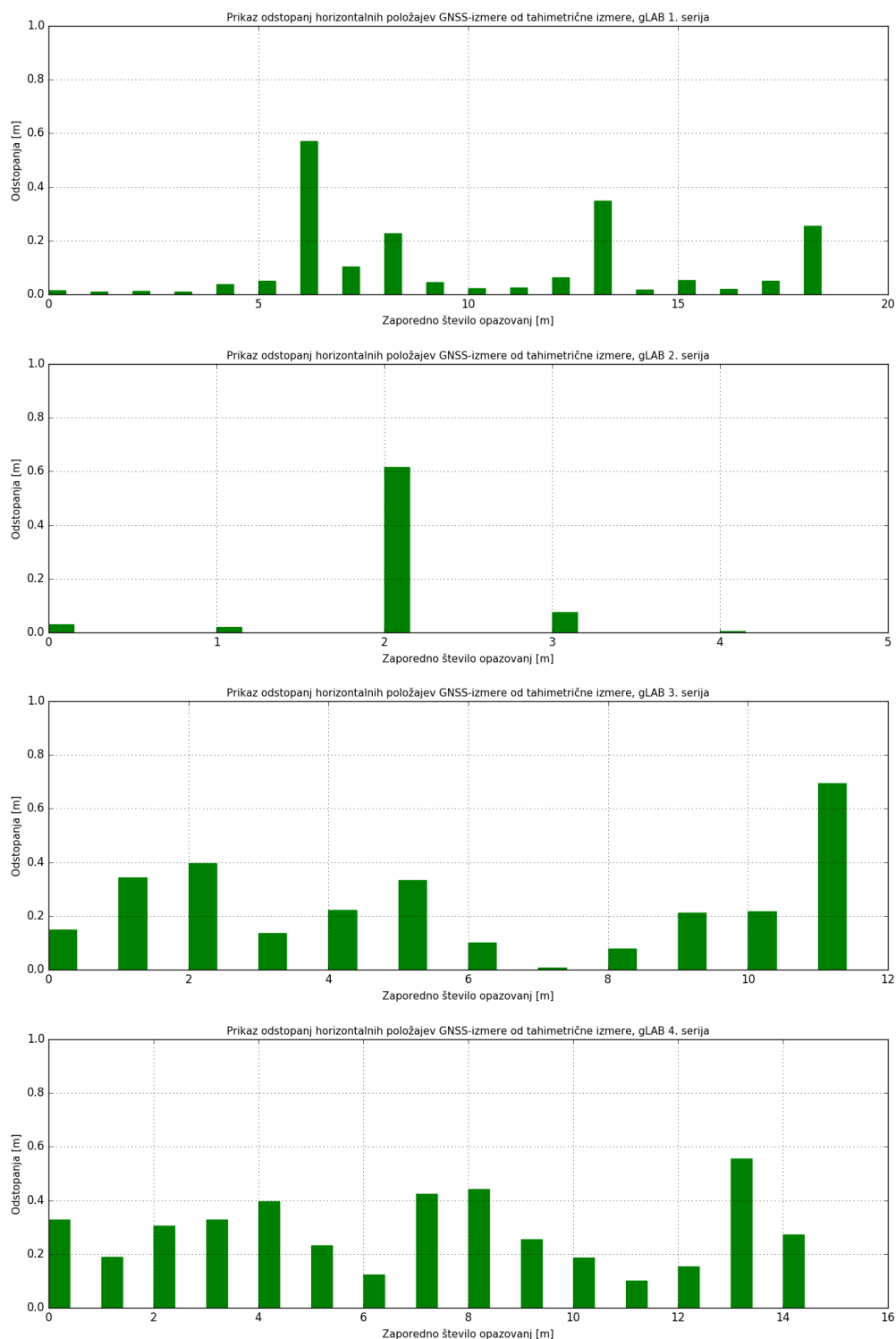


Slika 22: Odstopanja horizontalnih položajev magicGNSS po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Pri obdelavi opazovanj s spletnim programom magicGNSS so odstopanja najmanjša pri drugi seriji izmere, ki jim sledijo odstopanja prve serije izmere. Vrednosti odstopanj prve serije izmere so do izgube signala manjše od 10 centimetrov, po izgubi sprejema signala se povečajo do 60 centimetrov in se potem počasi zmanjšajo in dosežejo končne vrednosti pod 20 centimetrov. Skladnost horizontalnih položajev je pri drugi seriji izmere do izgube signala visoka, odstopanja

so manjša od 10 centimetrov. Z izgubo signala se odstopanja povečajo od 20 in do 40 centimetrov. Enako kot pri CSRS-PPP so odstopanja horizontalnih položajev večja pri tretji in četrti seriji izmere. Vrednost odstopanj se zaradi izgube signala poveča tudi do približno enega metra takoj na začetku in na koncu obeh serij izmer. Po prvi izgubi signala se vrednost odstopanj zmanjša na ena- do tridecimetrski nivo.

GLAB



Slika 23: Odstopanja horizontalnih položajev gLAB po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Zaradi obdelave opazovanj le s 30 s intervalom program gLAB ni uporaben za kinematična opazovanja, ampak le za statična. Odstopanja vseh serij kinematičnih opazovanj so manjša od 60 centimetrov. Najbolj točna sta prva in druga serija izmere, ki jima sledi tretja serija izmere. Iz grafov ni možno ugotoviti vpliva izgube sprejema signala.

RTKLIB



Slika 24: Odstopanja horizontalnih položajev RTKLIB po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Vrednosti odstopanj horizontalnih položajev so pri obdelavi s programom RTKLIB najmanjša pri prvi in drugi seriji izmere. Vrednosti odstopanj prve serije so do izgube signala manjša od 20 centimetrov, po izgubi signala se povečajo do 70 centimetrov in se potem počasi zmanjšajo in dosežejo vrednosti pod 40 centimetri. Odstopanja druge serije izmere so najmanjša. Vse do izgube signala so vsa odstopanja manjša ali enaka 10 centimetrom, po izgubi signala dosežejo vrednosti do 80 centimetrov. Največja odstopanja dobimo pri tretji in četrti seriji meritev. Obe seriji se obnašata podobno. Pri tretji seriji izmere so odstopanja nad 60 centimetrom že na začetku izmere in se z izgubo signala za 20 centimetrov poslabšajo ter so približno enaka ves čas izmere. S ponovno izgubo signala se odstopanja povečajo do 90 centimetrov in se pred zaključkom serije zmanjšajo pod nivo 60 centimetrov. Nekoliko manjša so odstopanja horizontalnih položajev četrte serije izmere, saj so na začetku izmere manjša od 20 centimetrov. Po prvi izgubi signala se povečajo za več kot 60 centimetrov, po drugi izgubi signala za več kot 80 centimetrov. Vzrok slabših rezultatov tretje in četrte serije izmere pri RTKLIB je slabša usklajenost koordinat ter dvakratna izguba signala med izmero.

5.3.2 Primerjava višin

Pri primerjavi višin primerjamo rezultate meritev dveh različnih tehnologij, ki določita višine v dveh različnih vrstah višin. Tako imamo dve možnosti primerjave višin, ki zagotavljata pravilne in primerljive rezultate:

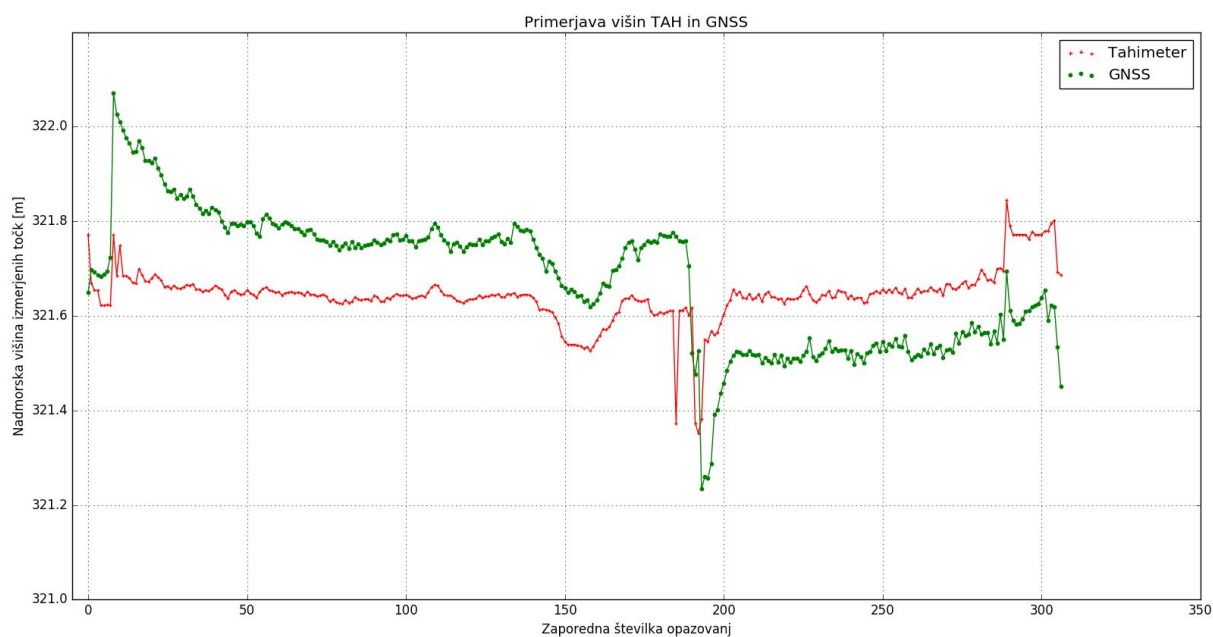
1. primerjava v sistemu elipsoidnih višin (h),
2. primerjava v sistemu ortometričnih višin (H).

Pri primerjavi v sistemu elipsoidnih višin moramo tahimetrično določene ortometrične višine (H) popraviti za vrednost geoidnih višin (N), pri primerjavi v sistemu ortometričnih višin moramo elipsoidne višine (h), ki smo jih dobili z GNSS-izmero, pretvoriti v ortometrične višine (H). Odločili smo se za primerjavo v sistemu ortometričnih višin, ker smo referenčne višine za primerjavo določili v sistemu ortometričnih višin.

Za primerjavo višin GNSS-izmere z višinami tahimetrične izmere potrebujemo usklajene ortometrične višine točk GNSS-izmere. Uskladitev koordinat smo opisali v poglavju 5.3. Ortometrične višine GNSS-izmere smo dobili s transformacijo koordinat s programom SitraNet. Izračunane so iz absolutnega modela geoida Slovenije. Program za analizo koordinat vrne ortometrične višine točk tahimetrične izmere in pripadajoče ortometrične višine GNSS-izmere. V nadaljevanju primerjamo višine GNSS glede na referenčne višine tahimetra, ki so popravljene glede na razliko med referenčno točko antene (ARP) in 360° prizme, ki znaša 5,9 cm. Za primerjavo višin izračunamo razliko med ortometričnimi višinami tahimetrične H_T ter GNSS-izmere H_G :

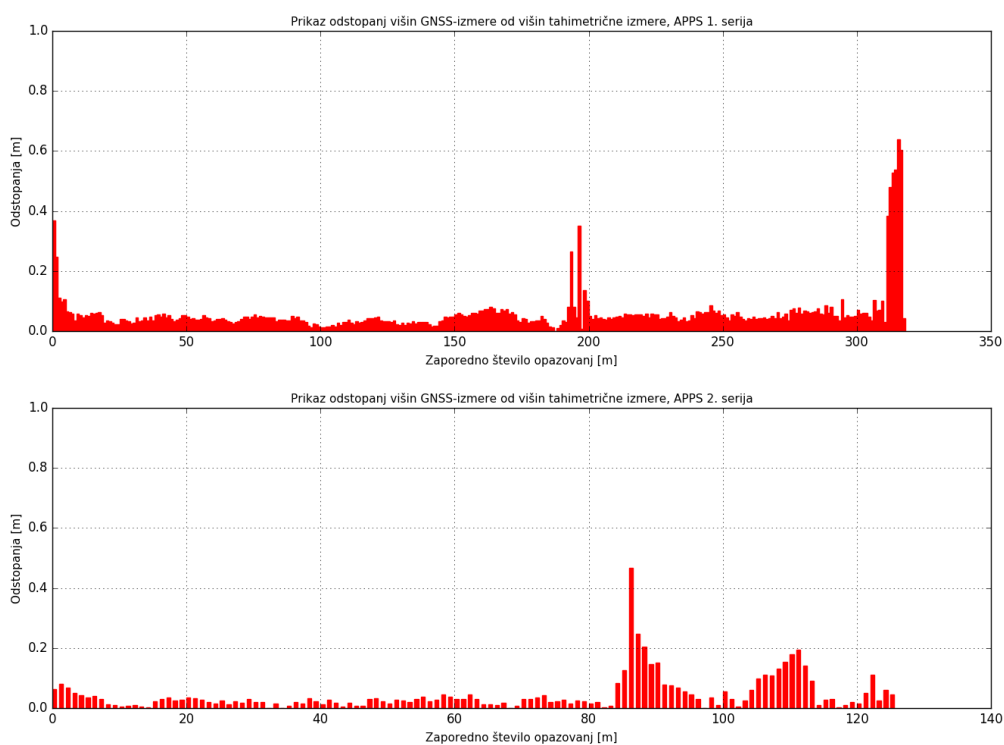
$$\Delta H = H_T - H_G \quad (13)$$

Rezultati primerjave so absolutne razlike med ortometričnimi višinami tahimetrične in GNSS-izmere. V poglavju 5.4 razlike med višinami statistično analiziramo. V nadaljevanju so grafično predstavljena odstopanja višin med tahimetrično in GNSS-izmero za programe APPS, CSRS-PPP, magicGNSS, gLAB in RTKLIB.



Slika 25: Primerjava višin s programom
(Vir: Spyder (Python 3.5))

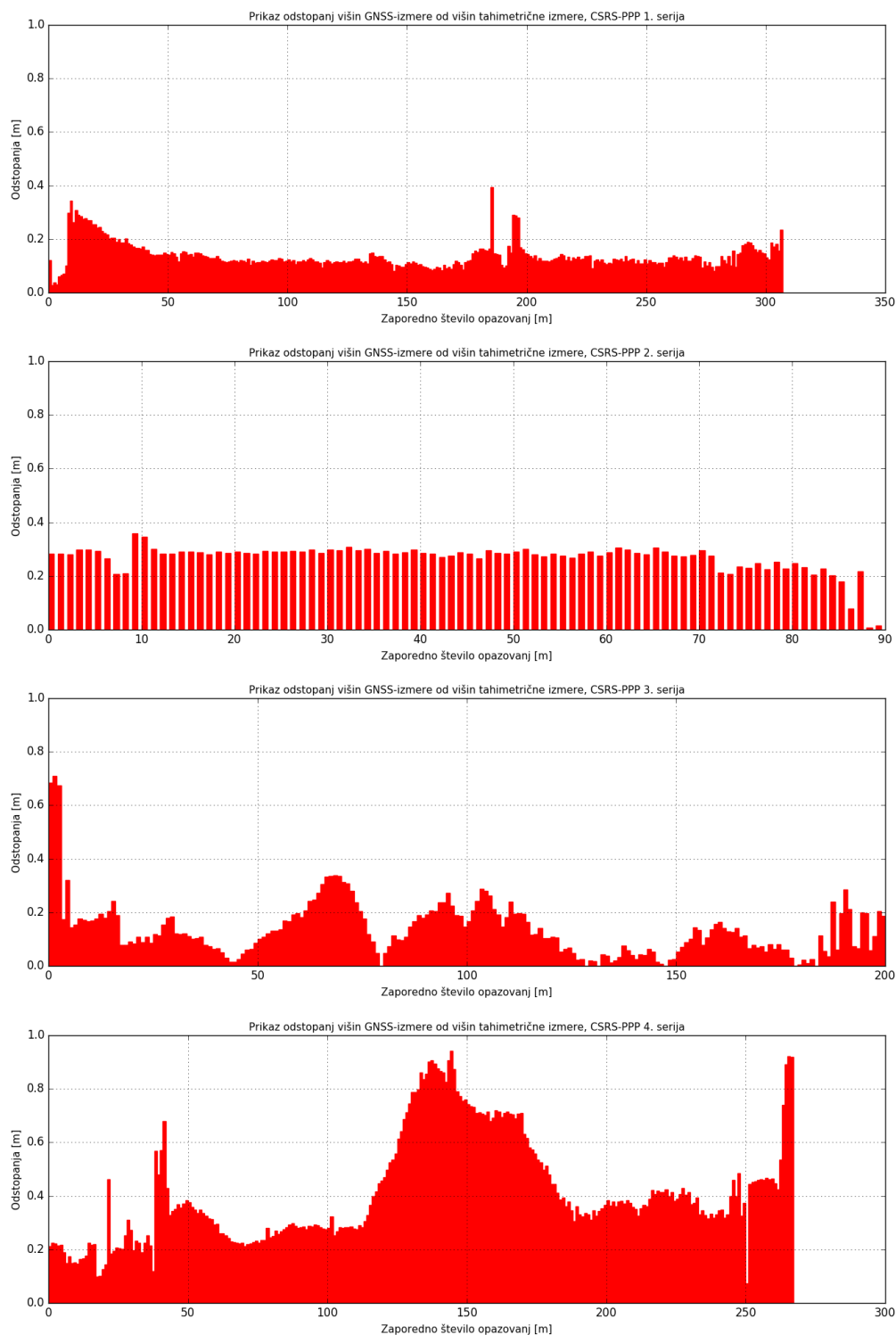
APPS



Slika 26: Odstopanja višin APPS po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Odstopanja med ortometričnimi višinami prve in druge serije so podobne pri spletnem programu APPS. Največja odstopanja znašajo do 60 centimetrov v prvi in do 45 centimetrov v drugi seriji izmere. Posledica večjih odstopanj višin je izguba signala med izmero.

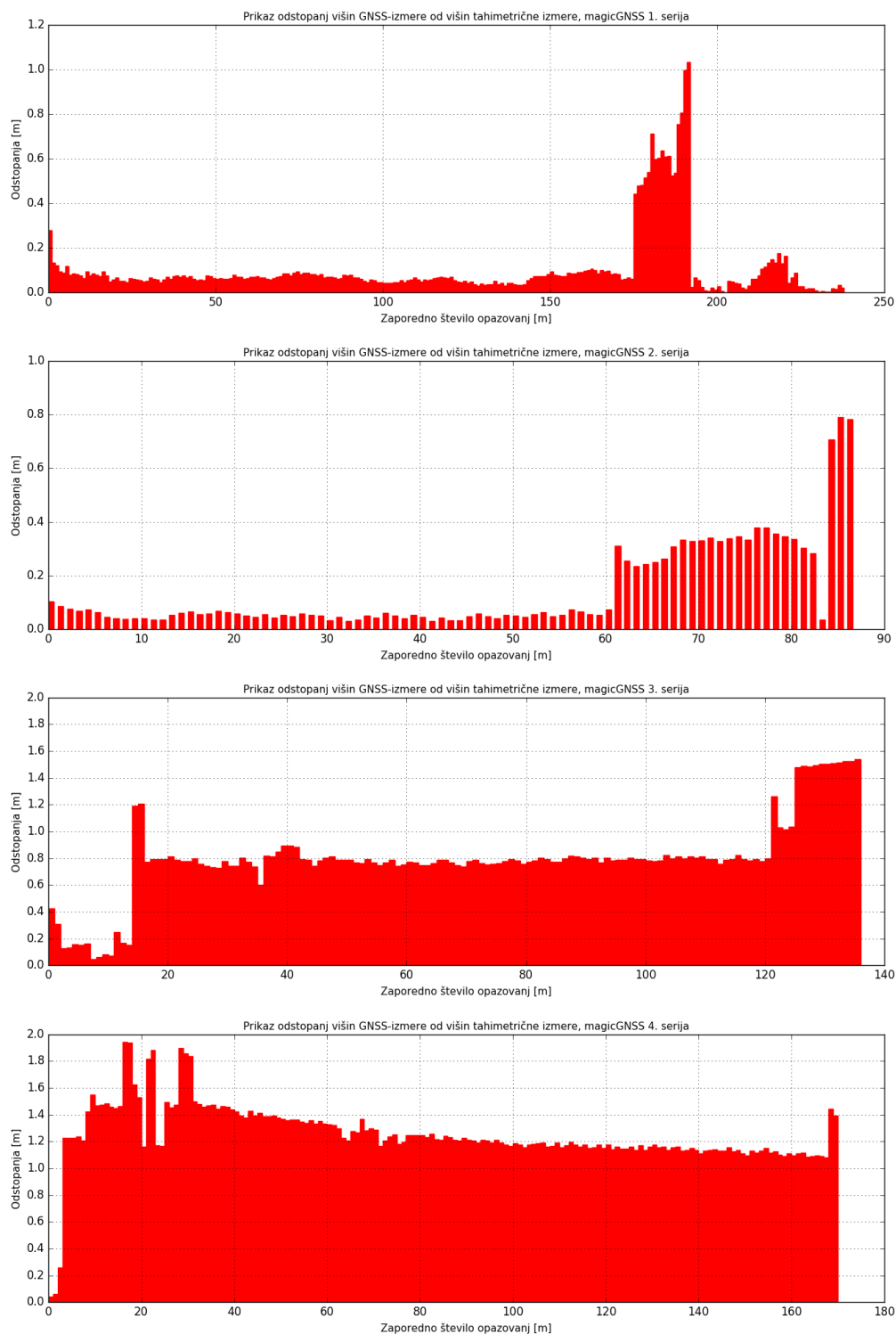
CSRS-PPP



Slika 27: Odstopanja višin CSRS-PPP po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Pri obdelavi s spletnim programom CSRS-PPP so vrednosti odstopanj višin najmanjša pri prvi seriji izmere. Velikost odstopanj je približno enaka med prvo serijo in znaša manj kot 20 centimetrov. Za približno 10 centimetrov slabša so odstopanja višin druge serije izmere. Odstopanja višin so večja pri tretji in četrti seriji izmere. Največja odstopanja višin pri tretji seriji izmere dosežejo vrednosti tudi do enega metra. Posledica slabših višin tretje in četrtje serije je dvakratna izguba sprejema signala med izmero.

MagicGNSS

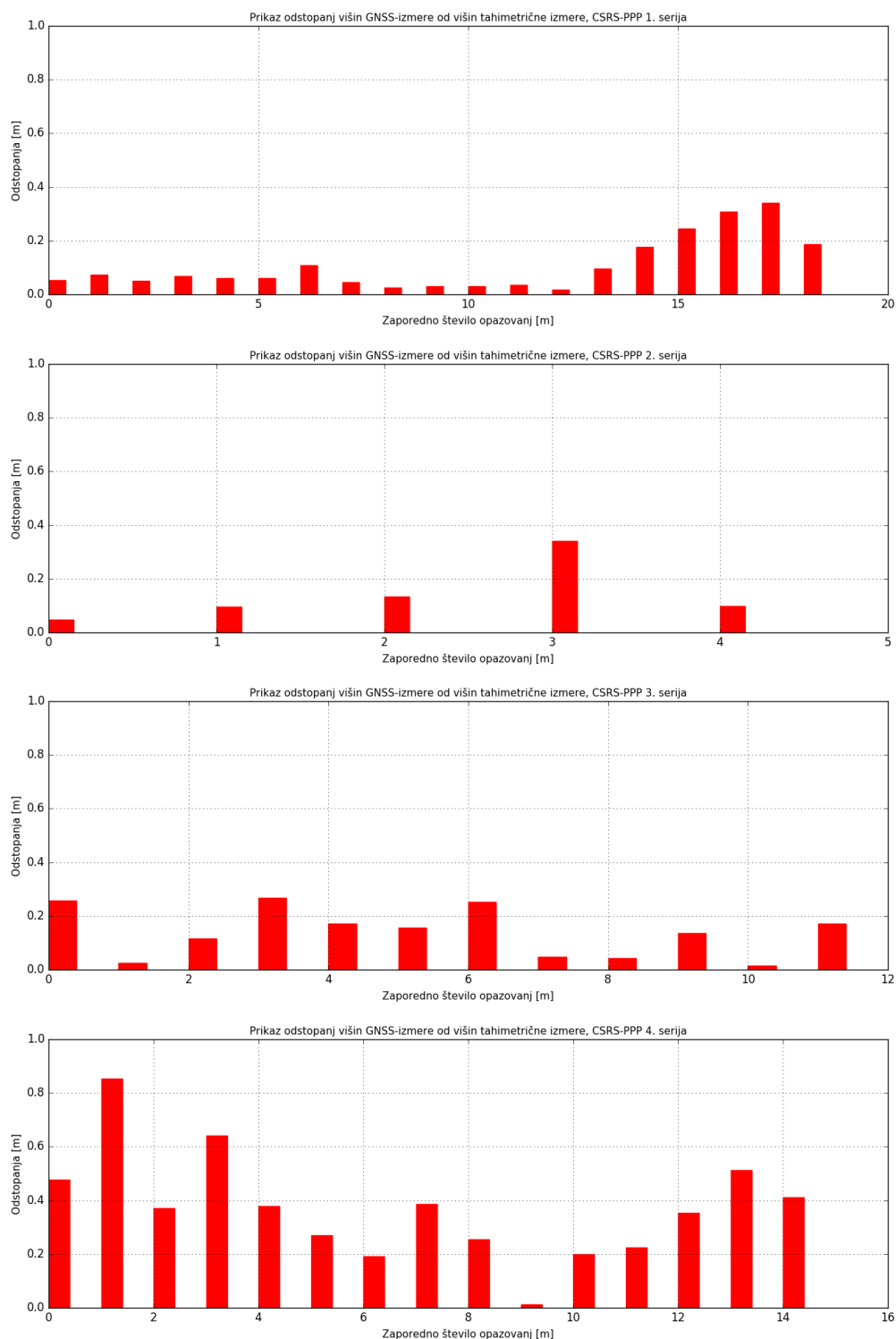


Slika 28: Odstopanja višin magicGNSS po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Odstopanja višin pri programu magicGNSS so do izgube signala pri prvi in drugi seriji približno enakega velikostnega reda. Velikost odstopanj do izgube signala znaša manj kot 10 centimetrov. Pri drugi seriji meritev se odstopanja povečajo za 20 centimetrov in do 60 centimetrov zaradi izgube signala. Odstopanja višin tretje in četrte serije izmere so zaradi izgube signala veliko večja. Pri tretji seriji izmere se velikost odstopanj zaradi izgube signala poveča z 20 centimetrov

na 1,2 metra, potem se zmanjša na 80 centimetrov in ostane približno nespremenjena do ponovne izgube signala, ki povzroči povečanje odstopanj do 1,6 metrov. Pri četrti seriji izmere so izmerjene višine že na začetku izmere slabše določene, izguba signala dodatno prispeva k slabšim rezultatom merjenih višin.

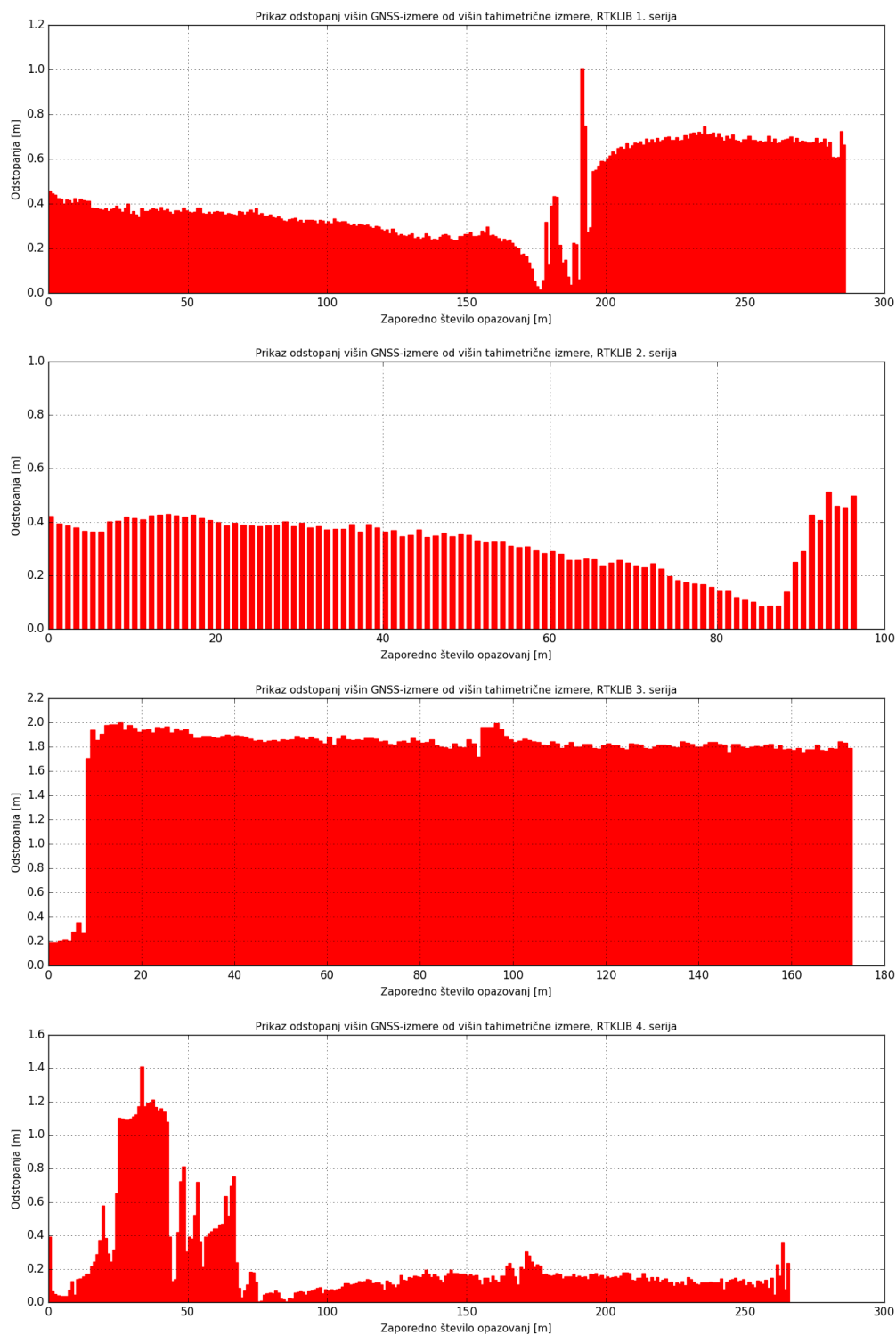
GLAB



Slika 29: Odstopanja višin gLAB po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Odstopanja višin programa gLAB so pri prvih treh serijah izmere majhna. Največje odstopanje znaša malo več kot 30 centimetrov. Slabše so višine četrte serije, kjer največje odstopanje znaša več kot 80 centimetrov. Ostala odstopanja so večja od 20 centimetrov.

RTKLIB



Slika 30: Odstopanja višin RTKLIB po serijah izmere
(Vir: Spyder (Python 3.5))

Določitev višin je najslabša pri programu RTKLIB, predvsem pri tretji seriji izmere. Pri prvi seriji izmere so odstopanja višin do izgube signala velikostnega reda 40 centimetrov ali manj, po izgubi signala se povečajo do več kot 60 centimetrov in se do zaključka izmere ne izboljšajo. Manjša so odstopanja višin pri drugi seriji izmere, kjer velikost odstopanj znaša manj kot 45 centimetrov. Med izmero se odstopanja manjšajo in dosežejo najmanjšo vrednost 10 centimetrov, po izgubi signala se spet povečajo na prejšnjo vrednost 40 centimetrov. Pri tretji seriji izmere se z izgubo sprejema signala takoj na začetku meritev vse merjene višine poslabšajo za približno 2 metra in se do konca serije bistveno ne spremenijo. Presenečajo odstopanja četrte serije, saj se po prvi izgubi signala po kratkem času zmanjšajo na manj kot 20 centimetrov in se do konca izmere bistveno ne spremenijo.

5.4 Analiza kinematične metode PPP

Sledi analiza koordinat, določenih s kinematično metodo PPP z izračunom numeričnih statistik za vsako serijo kinematičnih opazovanj. V prvem delu primerjamo horizontalne koordinate, in sicer razlike med oblikami poti GNSS-izmere in referenčne tahimetrične izmere. V drugem delu primerjamo odstopanja ortometričnih višin GNSS-izmere od referenčnih ortometričnih višin merjenih s tahimetrom.

Pri statistični analizi računamo osnovne numerične statistike za vsako serijo kinematičnih opazovanj GNSS. Vhodni podatki za izračun osnovnih statistik odstopanj horizontalnih položajev so razlike med oblikami poti tahimetrične in GNSS-izmere. Vhodni podatki za izračun statistične analize višin so razlike med ortometričnimi višinami tahimetrično izmerjenih višin točk in višin točk izmerjenih z GNSS-izmero.

Za namen statistične analize razlik r med položaji točk tahimetrije in GNSS računamo:

1. aritmetično sredino oz. povprečje razlik $\bar{r}$,
2. najmanjšo vrednost razlike $\min_r$,
3. največjo vrednost razlike $\max_r$,
4. standardni odklon razlik σ_r ,
5. koren srednjega kvadratnega pogreška razlik $r.m.s._r$.

Z aritmetično sredino izračunamo srednjo vrednost razlik položajev. Izračunane so minimalne in maksimalne vrednosti razlik položajev, ki kažejo na celotno razpršenost vzorca. Spodnja meja $\min_r$ je najmanjši člen vzorca, zgornja meja $\max_r$ je največji člen vzorca. Standardni odklon nam pove, kolikšna je razpršenost srednje vrednosti razlik položajev od referenčnih vrednosti položajev. Koren srednjega kvadratnega pogreška izračunamo kot koren povprečja vsote kvadratov razlik položajev (Turk, 2012).

$$r.m.s._r = \sqrt{\frac{1}{n}(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)} \quad (14)$$

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati statistične analize po serijah kinematičnih izmer za CSRS-PPP, APPS, magicGNSS, gLAB in RTKLIB. Vse točke GNSS-izmere smo primerjali z referenčnimi tahimetričnimi točkami.

Preglednica 3: Rezultati statistične analize CSRS-PPP

Horizontalni položaj	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya 4
$\bar{r}$ [m]	0,04	0,15	0,18	0,25
min_r [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
max_r [m]	0,91	0,53	0,75	0,53
σ_r [m]	0,06	0,09	0,15	0,14
$r.m.s_r$ [m]	0,07	0,17	0,23	0,28
Višina	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya 4
$\bar{r}$ [m]	0,14	0,27	0,14	0,41
min_r [m]	0,03	0,01	0,01	0,08
max_r [m]	0,40	0,36	0,17	0,94
σ_r [m]	0,05	0,05	0,11	0,20
$r.m.s_r$ [m]	0,14	0,27	0,17	0,46

Statistično gledano smo s spletno storitvijo CSRS-PPP dobili dobre rezultate tako v horizontalni smeri kot tudi v višini. Dobljeni rezultati kažejo na visoko točnost določitve položajev s kinematično metodo PPP. Odstopanja horizontalnih položajev so najmanjša v prvi in drugi seriji meritev ter se poslabšajo v zadnjih dveh serijah meritev, kar je posledica dvakratne izgube signala med izmero. Srednji kvadratni pogrešek r.m.s je v prvi seriji manjši od decimetra, v ostalih serijah se poveča od 10 in do približno 20 centimetrov, kar kaže na približno decimetrsko točnost horizontalnih položajev. Mero natančnosti horizontalnih položajev predstavimo s standardnim odklonom, ki je v prvih dveh serijah izmere manjši od 1 decimetra, v zadnjih dveh serijah je za 5 centimetrov večji.

Analiza razlik med ortometričnimi višinami merjenih točk kaže dobre rezultate. Odstopanja višin so, podobno kot pri horizontalnem položaju, najmanjša pri prvi seriji meritev in naraščajo pri ostalih treh serijah. Višine v povprečju odstopajo od 1 decimetra do 4 decimetrov v zadnji seriji. Slabši rezultat v višinskem smislu pri tretji in četrti seriji je znova posledica dvakratne izgube signala med izmero. Srednji kvadratni pogrešek r.m.s je za prvo in tretjo serijo manjši, ter znaša manj kot 17 centimetrov. Največjo vrednost srednjega kvadratnega pogreška dobimo pri 4. seriji meritev, kar je bilo pričakovano. Slabše so tudi višine druge serije, kar ni bilo pričakovano, ker bi morale biti podobne višinam prve serije izmere.

Preglednica 4: Rezultati statistične analize APPS

Horizontalni položaj	Serijska 1	Serijska 2
$\bar{r}[m]$	0,03	0,05
$min_r [m]$	0,01	0,01
$max_r [m]$	0,98	0,56
$\sigma_r [m]$	0,10	0,09
$r.m.s_r [m]$	0,10	0,10
Višina	Serijska 1	Serijska 2
$\bar{r} [m]$	0,06	0,04
$min_r [m]$	0,01	0,01
$max_r [m]$	0,64	0,47
$\sigma_r [m]$	0,07	0,06
$r.m.s_r [m]$	0,10	0,07

Spletna storitev APPS je obdelala le prvo in drugo serijo kinematičnih meritev, zato tretje in četrte serije izmere ni v zgornji preglednici. Gledano v celoti so razlike med oblikami poti podobne za obe seriji, saj v povprečju znašajo 5 centimetrov ali manj. Srednja kvadratna pogreška ter standardna odklona sta za obe seriji podobna in znašata 10 centimetrov. Presenečajo rezultati višin v prvi in drugi seriji meritev, saj so razlike izjemno majhne. Velikost odstopanj med višinami znaša v povprečju 6 centimetrov v prvi, in 4 centimetre v drugi seriji. Srednji kvadratni pogrešek višin znaša 10 centimetrov v prvi seriji in 7 centimetrov v drugi seriji, kar je izjemno dobro. Razlog manjših odstopanj med višinami je lahko posledica dobre uskladitve koordinat med tahimetrično in GNSS-izmero.

Preglednica 5: Rezultati statistične analize magicGNSS

Horizontalni položaj	Serijska 1	Serijska 2	Serijska 3	Serijska 4
$\bar{r} [m]$	0,06	0,03	0,11	0,15
$min_r [m]$	0,01	0,01	0,01	0,01
$max_r [m]$	0,50	0,38	0,85	0,96
$\sigma_r [m]$	0,10	0,07	0,11	0,16
$r.m.s_r [m]$	0,11	0,08	0,16	0,22
Višina	Serijska 1	Serijska 2	Serijska 3	Serijska 4
$\bar{r} [m]$	0,11	0,14	0,79	1,28
$min_r [m]$	0,01	0,03	0,05	0,04
$max_r [m]$	1,03	0,79	1,54	2,49
$\sigma_r [m]$	0,16	0,16	0,30	0,30
$r.m.s_r [m]$	0,19	0,22	0,85	1,32

MagicGNSS je obdelal vse 4 serije meritev. Povprečne razlike med horizontalnimi položaji točk znašajo manj kot 6 centimetrov za prvo in drugo serijo meritev ter manj kot 20 centimetrov za tretjo in četrto serijo meritev. Standardni odkloni razlik serij so podobni. Razen pri četrti seriji, kjer znaša standardni odklon 16 centimetrov. Srednji kvadratni pogreški se bistveno ne razlikujejo. Največje razlike v horizontalnem položaju tahimetra in GNSS sprejemnika so znova v četrti in tretji seriji, kar je posledica dvakratne izgube sprejema signala med izmero.

Slabše so določene ortometrične višine točk v tretji in četrti seriji. Višine tretje serije se v povprečju razlikujejo za 0,8 metra. Največja odstopanja v višini točk tretje serije znaša 1,54 metra. Višine četrte serije so v povprečju za 0,5 metra večje kot višine tretje serije. Največje odstopanje med višinami četrte serije znaša 2,49 metra, kar je ogromno. Kljub velikim odstopanjem se višine porazdeljujejo podobno. Standardna odklona razlik sta enaka za tretjo in za četrto serijo. Srednja kvadratna pogreška tretje in četrte serije se razlikujeta za 0,5 metra. Izguba signala močno poslabša natančnost določitve višin, ki se z nadaljnjimi meritvami izboljša, če se signal med izmero znova ne izgubi. Ker se je signal pri tretji in četrti seriji dvakrat izgubil, prvič na začetku in drugič na koncu izmere, lahko potrdimo, da so slabši rezultati posledica izgube sprejema signala.

Preglednica 6: Rezultati statistične analize gLAB

Horizontalni položaj	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya4
$\bar{r}$ [m]	0,10	0,15	0,24	0,29
min_r [m]	0,01	0,01	0,01	0,10
max_r [m]	0,57	0,62	0,69	0,55
σ_r [m]	0,14	0,23	0,18	0,12
$r.m.s_r$ [m]	0,18	0,28	0,30	0,31
Višina	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya4
$\bar{r}$ [m]	0,11	0,14	0,14	0,37
min_r [m]	0,02	0,05	0,02	0,01
max_r [m]	0,34	0,34	0,27	0,85
σ_r [m]	0,10	0,10	0,09	0,20
$r.m.s_r$ [m]	0,14	0,18	0,16	0,42

Zaradi majhnega števila obdelanih opazovanj program gLAB ni verodostojen, saj zaradi majhnosti vzorca rezultati programa niso primerljivi z ostalimi programi za obdelavo meritev. Izmed vseh 1220 dobljenih položajev je samo 51 kinematičnih, ostali položaji so rezultat statičnih meritev. Pri statistični analizi tako primerjamo 19 razlik položajev v prvi, 8 v drugi, 12 v tretji in 16 v četrti seriji. Razlike med horizontalnimi položaji serij meritev v povprečju znašajo od 10 do 30 centimetrov. Maksimalna in minimalna odstopanja so podobna za vse štiri serije. Prav tako ostale vrednosti statistike. Višine opazovanih točk so si podobne v prvih treh serijah izmere. Četrta serija izmere je znova najmanj natančna, kar je posledica dvakratne izgube sprejema signala med izmero. Dobri rezultati statistične analize so posledica majhnosti vzorca.

Preglednica 7: Rezultati statistične analize RTKLIB

Horizontalni položaj	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya4
$\bar{r}$ [m]	0,14	0,09	0,67	0,53
min_r [m]	0,01	0,01	0,01	0,01
max_r [m]	0,72	0,82	0,94	0,96
σ_r [m]	0,12	0,17	0,21	0,29
$r.m.s_r$ [m]	0,18	0,19	0,70	0,61
Višina	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3	Seriya4
$\bar{r}$ [m]	0,43	0,32	1,77	0,24
min_r [m]	0,01	0,08	0,19	0,01
max_r [m]	1,00	0,51	2,02	1,41
σ_r [m]	0,19	0,10	0,34	0,28
$r.m.s_r$ [m]	0,47	0,34	1,81	0,37

Pri uskladitvi koordinat tretje in četrte serije meritev je prišlo do težav, saj so bila statična opazovanja tretje in četrte serije pogrešena za 1 meter v smeri e. Zato so slabši rezultati statistične analize posledica slabše uskladitve koordinatnih sistemov pri RTKLIB. Pri ostalih programih teh težav ni bilo. Zaradi težav uskladitve koordinat lahko tretjo in četrto serijo izločimo iz statistične analize.

Razlike med horizontalnimi položaji prve in druge serije bistveno ne odstopajo. Povprečna velikost razlik znaša 14 centimetrov za prvo in 9 centimetrov za drugo serijo. Standardni odklon razlik je za obe seriji manjši od 18 centimetrov. Srednji kvadratni pogrešek prve in druge serije se razlikuje za 1 centimeter. Potrdimo lahko, da so rezultati razlik horizontalnih položajev prve in druge serije podobni.

Višine prve serije so v povprečju za 10 centimetrov slabše določene kot višine druge serije. Standardni odklon odstopanj višin znaša 19 centimetrov za prvo serijo in 10 centimetrov za drugo serijo. Srednja kvadratna pogreška prve in druge serije se razlikujeta za 14 centimetrov. Višine prve serije izmere so slabše določene kot višine druge serije izmere. Pri obeh serijah se je sprejem signala med izmero enkrat izgubil, kar je vzrok slabših rezultatov statistične analize.

6 ANALIZA

Analizo rezultatov smo razdelili na dva dela. V prvem poglavju analiziramo rezultate obdelave s programsko opremo PPP. V drugem delu analiziramo kinematično metodo PPP z oceno kakovosti in uporabnosti v kinematičnih aplikacijah visoke natančnosti.

6.1 Analiza rezultatov obdelave s programsko opremo PPP

Opazovanja smo izvedli v štirih serijah. Vsako serijo smo analizirali ločeno glede na program, s katerim smo obdelali opazovanja. Rezultati obdelave s programi se razlikujejo zato jih analiziramo v posameznih kategorijah.

Rezultati obdelave s spletno storitvijo CSRS-PPP so v splošnem zelo dobri in v skladu s pričakovanji. Standardni odkloni pri primerjavi horizontalnih položajev znašajo 6, 9, 15 in 14 centimetrov za prvo, drugo, tretjo in četrto serijo izmere. Maksimalna odstopanja med tahimetričnimi in GNSS koordinatami znašajo od 0,51–0,91 metra. Minimalna odstopanja so manjša ali enaka centimetru. Povprečne razlike med horizontalnimi položaji so najmanjša pri prvi seriji izmere in se večajo z naslednjimi serijami izmere. Slabši so rezultati analize razlik ortometričnih višin. Povprečna odstopanja višin znašajo od 14–41 centimetrov. Maksimalno odstopanje med višinami točk znaša 0,94 metra. Najmanjše odstopanje med višinami znaša centimeter. Standardna odklona odstopanj višin sta enaka za prvo in drugo serijo in znašata 5 centimetrov. Standardni odklon tretje serije znaša 11 centimetrov, četrte serije 20 centimetrov. Slabši rezultati analize pri tretji in četrty seriji so posledica dvakratne izgube sprejema signala med izmero. Storitev CSRS-PPP je opazovanja obdelala kakovostno. Z analizo razlik horizontalnih in višinskih položajev smo potrdili točnost kinematične metode PPP.

Najboljše rezultate analize smo dobili s spletno storitvijo APPS, kar ne preseneča glede na to, da program ni obdelal tretje in četrte serije izmere, ki vsebujeta največ pogreškov zaradi dvakratne izgube sprejema signala. Povprečna odstopanja med horizontalnimi položaji tahimetrične in GNSS izmere znašajo manj kot 5 centimetrov. Maksimalne razlike med horizontalnimi položaji so velikostnega reda 0,56–0,98 metra, minimalne razlike znašajo manj kot centimeter. Standardna odklona razlik horizontalnih položajev znašata 9 centimetrov v prvi in 10 centimetrov v drugi seriji izmere, kar je zelo dobro. Rezultati so kakovostni tudi v višinskem smislu. Preglednica 2 prikazuje rezultate statičnih izmer vseh serij opazovanj. Najmanjše razlike med stebroma FGG2 v prvi in drugi seriji so pri APPS, kar potrjuje skladnost položajev tahimetrične in GNSS-izmere v prvi in drugi seriji.

S spletno storitvijo magicGNSS dobimo podobne rezultate analize horizontalnih položajev kot s storitvijo CSRS-PPP. Storitev vrne boljše rezultate za drugo, tretjo in četrto serijo izmere. Standardni odkloni razlik horizontalnih položajev znašajo od 10–16 centimetrov. Najbolj natančna je druga serija izmere, saj standardni odklon razlik znaša 3 centimetre. Maksimalna odstopanja med serijami so velikostnega reda 0,38–0,96 metra. Najslabše natančnosti razlik horizontalnih položajev dobimo pri tretji in četrty seriji izmere, kar je bilo pričakovano. Odstopanja med višinami prve in druge serije meritev so majhne. Standardna odklona dosežata velikost 16 centimetrov, kar je mala razlika. Odstopanja višin tretje in četrte serije so mnogo večja. Maksimalno odstopanje med višinami tretje in četrte serije meritev je 1,54–2,49 metra, kar je posledica izgube signala med izmero. Povprečje odstopanj je 0,79–1,28 metra. Kljub velikim odstopanjem se višine porazdeljujejo podobno. Standardna odklona odstopanj višin sta enaka za obe seriji in sta velikostnega reda 30 centimetrov. Višine prve in druge serije izmere so bolj točne od višin tretje in četrte serije. Razlog za to je znova dvakratna izguba signala med izmero.

Najmanj kinematičnih položajev smo dobili s programom gLAB, kar ne preseneča, ker program obdela položaje le vsakih 30 s, torej je namenjen le za obdelavo statičnih opazovanj. Majhno število rezultatov prispeva k majhnosti vzorca za analizo in posledično k boljšim rezultatom analize. Razlike horizontalnih položajev so najmanjše pri prvi in četrti seriji izmere. Maksimalna odstopanja so velikosti 0,55–0,69 metra. Standardni odkloni razlik so manjši od 23 centimetrov. Najslabše natančnosti sta druga in tretja serija izmere. Najboljše natančnosti je četrta serija, s standardnim odklonom 14 centimetrov. Točnost horizontalnih položajev preseneča pri četrti seriji. Razlog za to je majhno število kinematičnih položajev za vsako serijo. Vrednosti odstopanj višin pri gLAB so podobne za prve tri serije izmere, saj so standardni odkloni odstopanj približno enaki. Najslabše določene višine ima četrta serija izmere, kjer maksimalno odstopanje doseže 0,85 metra in standardni odklon 20 centimetrov. V povprečju višine odstopajo za približno 40 centimetrov. Program gLAB ni najboljši program za obdelavo kinematičnih meritev, saj vrne premalo položajev točk. Uporaben bi bil pri hitri statični metodi izmere ali pri metodi Stop and Go.

RTKLIB je določil koordinate za približno enako število točk kot spletni storitvi CSRS-PPP in magicGNSS. Povprečne razlike med horizontalnimi položaji prve in druge serije znašajo 9–15 centimetrov. Povprečne razlike tretje in četrte serije meritev so večje in so velikostnega reda 0,53–0,67 metra. Maksimalna odstopanja med položaji točk tahimetrične in GNSS-izmere so velikostnega reda 0,72–0,96 metra. Skladnost položajev točk tahimetra in GNSS sprejemnika je največja v prvi seriji, kjer standardni odklon znaša 12 centimetrov. Standardni odkloni druge serije znaša 17 centimetrov. Slabše ujemanje položajev zasledimo pri tretji in četrti seriji izmere. Velikost standardnega odklona tretje serije je 21 centimetrov, četrte serije 29 centimetrov. Posledica večjega odstopanja horizontalnih položajev tretje in četrte serije meritev je dvakratna izguba signala na začetku in na koncu izmere. Vrednosti odstopanj višin so podobne za prvo in drugo serijo izmere. V povprečju se razlikujejo za 10 centimetrov. Za 9 centimetrov se razlikujeta tudi standardna odklona odstopanj viši prve in druge serije. Skladnost višin tretje in četrte serije je najslabša. Višine tretje serije meritev so popolnoma neskladne z višinami tahimetra, kar lahko pripišemo izgubi signala med izmero in možnim neusklajenim koordinatam zaradi slabših rezultatov obeh serij statičnih izmer na stebru FGG4. Rezultati tretje serije so neuporabni. Višine četrte serije so primerljive s prvo in drugo serijo izmere. Skladnost višin je večja kot skladnost horizontalnih položajev. Vzrok za to je izločitev sistematičnih pogreškov zaradi izgube signala sprejemnika. RTKLIB pogrešenih koordinat ne izloči iz obdelave. To je prepuščeno uporabniku.

Ker sta tretja in četrta serija opazovanj opravljena v težjih razmerah, sta podvržena večjim vplivom kot opazovanja prve in druge serije. Dobljeni položaji točk tretje in četrte serije so zato slabše točnosti kot položaji prve in druge serije izmere. Razlog za to je dvakratna izguba signala, prvič takoj na začetku in drugič pred koncem izmere posamezne serije. Izguba signala takoj na začetku izmere občutno poslabša vse nadaljnje merjene položaje tudi po ponovnem sprejemu signala. Čas, ki je potreben da se koordinate PPP spet približajo koordinatam terestrične izmere, je odvisen od časa, ko je bil dostop signala do GNSS sprejemnika oviran. Daljši kot je čas motenega dostopa signala, daljši bo čas, ki bo potreben, da se merjene koordinate približajo koordinatam pred izmero. Pri kinematičnih meritvah smo pod nadstreškom čakali približno 45 s. Po ponovnem sprejemu signala merska oprema izgubi inicializacijo, zato je priporočljivo vsaj 2 do 3 minute počakati pred nadaljevanjem kinematične izmere. Merjene koordinate po izgubi signala na začetku serije so se terestričnim koordinatam približale po približno treh minutah, vendar so odstopanja med položaji GNSS-izmere in tahimetričnimi položaji znašala več kot 15 centimetrov, v nekaterih primerih tudi več kot 20 centimetrov. Kakovost dobljenih položajev po izmeri najlažje ugotavljamo s primerjavo višin, saj te potrebujejo več časa, da se približajo začetni vrednosti pred izgubo signala. Pri tretji seriji CSRS-PPP so se višine približale začetnim višinam po približno treh minutah, pri magicGNSS in RTKLIB se višine niso približale začetnim

višinam, saj so bile ves čas kinematične izmere pogrešene za meter ali več. Pri četrti seriji izmere se višine CSRS-PPP in magicGNSS niso približale začetnim višinam. Pri magicGNSS so se višine počasi približevale začetni vrednosti, dokler ni prišlo do ponovne izgube signala, kar je merjene višine dodatno poslabšalo. Podobno situacijo opazimo tudi pri rezultatih obdelave s CSRS-PPP in RTKLIB. Da bi se izognili slabšim rezultatom zaradi izgube signala med izmero je priporočljivo izvesti inicializacijo merske opreme in potem nadaljevati z izmero.

Iz rezultatov obdelav s posameznimi programi ugotovimo, da so položaji točk najbolj skladni pri obdelavi z APPS, ki mu sledijo CSRS-PPP, magicGNSS, gLAB in RTKLIB. Program gLAB zaradi majhnega števila vrnjenih rezultatov ni primerljiv z ostalimi programi. Problem obdelave opazovanj s spletnimi programi predstavlja primer črne škatle (angl. black box), kjer notranje zgradbe oz. delovanja programov ne poznamo, vemo le to, kaj so vhodni podatki in kaj izhodni podatki. Najmanj nastavitve omogočajo CSRS-PPP, APPS in magicGNSS. Največ nastavitve pri obdelavi opazovanj ima spletna storitev GAPS, ki ni vrnila rezultatov. Za obdelavo meritev sta bolj uporabna samostojna programa gLAB in RTKLIB, ki s spreminjanjem nastavitve obdelave omogočata veliko svobodo uporabniku. Vsebujeta tudi lastni modul grafične predstavite ter analize rezultatov.

6.2 Analiza kinematične metode PPP

Skladnost položajev pridobljenih z metodo PPP je velikostnega reda 10–20 centimetrov pri horizontalnem položaju in velikostnega reda 10–40 centimetrov v višini. Trditev, da lahko z metodo PPP v kinematičnem načinu dosežemo nekaj decimetrsko natančnost smo tako dokazali. Predpostavili smo, da so opazovanja z večkratno izgubo sprejema signala slabše točnosti. Tudi ta predpostavka se je izkazala za pravilno, saj sta skladnost in natančnost položajev točk tretje in četrte serije slabši v primerjavi s prvo in drugo serijo izmere, kjer se je signal med izmero izgubil le enkrat. Takojšnja izguba signala na začetku kinematičnih meritev občutno poslabša nadaljnje merjene položaje točk, predvsem v višini.

Pri meritvah z metodo PPP moramo biti zelo previdni, da ne pride do izgube sprejema signala. Z metodo PPP smo dobili predvidene rezultate. Slabost metode PPP je v tem, da smo za visoko natančnost merjenih položajev prisiljeni čakati na končne produkte službe IGS. Možna je sicer obdelava v skoraj realnem času, vendar so rezultati slabše natančnosti. Pred izvedbo kinematičnih meritev moramo mersko opremo inicializirati. Čas inicializacije znaša od pol do ene ure, odvisno od okolja. Izkaže se, da je kinematična metoda PPP primerna za določitev položajev točk nižje natančnosti na osnovi GNSS. Za visoko natančnost položajev točk je smiselno uporabiti metodo PPP v večurnem statičnem načinu. Ena izmed glavnih prednosti metode je popolna neodvisnost od državnega omrežja stalnih postaj in nizki stroški uporabe metode. Z dokončno izgradnjo evropskega satelitskega sistema Galileo in s kombinirano uporabo satelitov GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou bo metoda PPP v prihodnosti natančnejša ne samo v statičnem, temveč tudi v kinematičnem načinu izmere.

7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo raziskovali kinematično metodo PPP. Najprej smo predstavili osnovne teoretične pojme, ki so nujni za razumevanje izmere z metodo PPP. Za namen kinematičnega preizkusa smo izvedli štiri serije kinematičnih opazovanj s predhodnimi statičnimi opazovanji potrebnimi za inicializacijo merske opreme. Prvi dve seriji meritev smo izvedli z eno izgubo signala med izmero na koncu serije. Zadnji dve seriji meritev smo izvedli z dvakratno izgubo signala takoj na začetku in potem na koncu serije. Vsako kinematično serijo meritev smo istočasno spremljali s tahimetrom. Uporabili smo sistem Leica SmartPole. Meritve smo obdelali z brezplačno programsko opremo, ki je na voljo na spletu. Položaji dobljeni s tahimetrom so bili referenčni položaji za primerjavo položajev dobljenih z metodo PPP. Za primerjavo položajev GNSS-izmere in tahimetrične izmere smo izdelali lastno programsko rešitev v programskem jeziku Python. Mera natančnosti za analizo so bile razlike med oblikami poti horizontalnih položajev in razlike med ortometričnimi višinami GNSS-izmere in tahimetrične izmere. S statistično analizo smo prikazali povprečne razlike, maksimalne in minimalne razlike, standardne odklone razlik ter srednji kvadratni pogrešek razlik. Rezultati lahko služijo uporabnikom, ki jih bo v prihodnosti zanimala izvedba meritev s kinematično metodo PPP. Analizo rezultatov obdelave s programsko opremo PPP in analizo kinematične metode PPP predstavlja poglavje 6.

Diplomsko delo odpira tudi možnosti za nadaljnje raziskave na tem področju. Zanimiva bi bila izvedba kinematičnih meritev v urbanih območjih, kjer bi se vpliv večpotja povečal in sprejem signala večkrat izgubil med samo izmero. Dodatno bi lahko povečali interval registracije položajev točk med izmero in analizirali natančnost metode z daljšanjem časa sprejema signala na posameznih točkah. Na točkah bi lahko sprejemali signal pol minute, eno minuto ali dve minuti, ter dobljene položaje primerjali med sabo. S krajšanjem časa predhodnih statičnih opazovanj potrebnih za inicializacijo merske opreme bi lahko ugotavljali natančnost kinematičnih meritev v odvisnosti od dolžine predhodne statične inicializacije merske opreme.

VIRI

APPS. 2017. Automatic Precise Point Positioning. <http://apps.gdgps.net/index.php> (Pridobljeno 17. 3. 2017.)

Ashby, N. 2003. Relativity in the Global Positioning System. Living Reviews in Relativity 6: 1: 5–42. <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2003-1>.

Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M., Borjesson, J. A. 1998. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 103: B3: 5019–5035. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/97JB03534/abstract>.

Bilban, G. 2014. Analiza kakovosti določitve položaja v omrežjih postaj GNSS. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 215 str. http://drugg.fgg.uni-lj.si/4569/1/GEM052_Bilban.pdf (Pridobljeno 16. 7. 2017.)

Bisnath, S., Gao, Y. 2009. Precise Point Positioning, A Powerful Technique with a Promising Future. GPS World 4: 1: 43–50. <http://www2.unb.ca/gge/Resources/gpsworld.april09.pdf>.

CSRS. 2017. Canadian Spatial Reference System - PPP. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php?locale=en> (Pridobljeno 17. 3. 2017.)

Čadež, P. 2010. Analiza metod geodetske GNSS izmere. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Čadež): 119 str. http://drugg.fgg.uni-lj.si/220/1/GEU_0826_Cadez.pdf (Pridobljeno 17. 3. 2017.)

EPN. 2017. EUREF Permanent GNSS Network. <http://www.epncb.oma.be/> (Pridobljeno 3. 7. 2017.)

GAPS. 2017. GPS Analysis and Positioning Software. <http://gaps.gge.unb.ca/about.html> (Pridobljeno 17. 3. 2017.)

GLAB. 2017. European Space Agency, gAGE. http://gage.upc.edu/sites/default/files/gLAB/gLAB_SUM.pdf (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

IGS. 2017. International GNSS Service. <http://www.igs.org/> (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

Jelenc, B. 2006. Relativnostni vplivi na GPS opazovanja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 56 str. http://drugg.fgg.uni-lj.si/541/1/GEU_0686_Jelenc.pdf (Pridobljeno 16. 7. 2017.)

Karabatić, A. 2011. Precise Point Positioning (PPP). An alternative technique for ground based GNSS troposphere monitoring. Vienna University of Technology: 177 str.

Kouba, J., Héroux, P. 2001. Precise Point Positioning using IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions 5: 2: 12–28. <https://link.springer.com/article/10.1007/PL00012883>.

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. Geodetski vestnik 47: 4: 404–413. http://www.geodetski-vestnik.com/47/4/gv47-4_404-413.pdf.

Kuhar, M. 2016. Gradiva pri predmetu Satelitska geodezija. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

Leick, A. 1995. GPS Satellite Surveying. Second Edition. New York: John Wiley in Sons, Inc: 840 str.

Lovenjak, K. 2015. Analiza natančnosti in uporabnosti enofrekvenčnih GNSS senzorjev. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/5308> (Pridobljeno 28. 11. 2016.)

MagicGNSS. 2017. GMV magicGNSS. <https://magicgnss.gmv.com/ppp> (Pridobljeno 17. 3. 2017.)

Malinowski, M., Kwiecień, J. 2016. A Comparative Study of Precise Point Positioning (PPP) Accuracy Using Online Services. Reports on Geodesy and Geoinformatics 102: 1: 15–31. <https://www.degruyter.com/view/j/rgg.2016.102.issue-1/rgg-2016-0025/rgg-2016-0025.xml?format=INT>.

Natural Resources Canada. 2017. The Precise Point Positioning Software Centre. <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html> (Pridobljeno 15. 7. 2017.)

Nistor, S., Stelian Buda, A. 2016. Analiza vpliva uporabe popravkov ur satelitv pri uporabi metode Precise Point Positioning (PPP). Geodetski Vestnik 30: 3: 483–494. http://www.geodetski-vestnik.com/60/3/gv60-3_nistor.pdf.

Omrežje SIGNAL). 2017. Služba za GPS. <http://www.gu-signal.si/> (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

Pavlovčič Prešeren, P. 2016. Gradiva pri vajah GNSS v geodeziji. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

Petit, G., Luzum, B. 2010. IERS Conventions. Nemčija: Verlag des Bundesamts für Geodäsie und Karthographie. http://iers-conventions.obspm.fr/2010/2010_official/tn36.pdf.

Ramahlo Marrerios, J. 2012. Kinematic GNSS Precise Point Positioning: Application to marine platforms. PhD Th. Porto, University of Porto, Faculty of Sciences. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/66684/2/24150.pdf> (Pridobljeno 28. 11. 2016.)

Royal Observatory of Belgium (ROB), G. R. G. 2017. How GNSS Works. <http://gage.upc.edu/gLAB> (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

RTKLIB. 2017. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M., Hernández-Pajares, M. 2013a. GNSS Data Processing: Fundamentals and Algorithms. Zv. 1. European Space Agency: 238 str.

Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M., Hernández-Pajares, M. 2013b. GNSS Data Processing: Laboratory Exercises. Zv. 2. European Space Agency: 344 str.

SitraNet. 2017. <http://www.sitranet.si> (Pridobljeno 29. 6. 2017.)

Sterle, O. 2007. Združevanje klasičnih geodetskih in GNSS opazovanj v geodinamičnih raziskavah. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. http://drugg.fgg.uni-lj.si/752/1/GEM_0045_Sterle.pdf (Pridobljeno 28. 11. 2016.)

Sterle, O. 2015. Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba O. Sterle): 194 str. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5376/> (Pridobljeno 5. 5. 2017.)

Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. 2014. Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. Geodetski vestnik 58: 3: 466–481. http://www.geodetski-vestnik.com/58/3/gv58-3_sterle.pdf (Pridobljeno 26. 2. 2017.)

Stöcker, H. 2006. Matematični priročnik z osnovami računalništva. 4. izdaja. Tehniška založba Slovenije: str. 306–310.

Stopar, B. 2016. Gradiva pri predmetu GNSS v geodeziji. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

Turk, G. 2012. Verjetnosti račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 9–14.

UCS. 2017. UCS Satellite Database. <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database#.WXuL04h95Pa> (Pridobljeno 15. 7. 2017.)

Vok, T. 2015. Vpliv različnih pogojev izvedbe statičnih opazovanj GNSS na določitev položaja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5737/> (Pridobljeno 5. 5. 2017.)