

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA

Ljubljana, 2021

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.3:528.74(043.3)
Avtor:	Anja Šinkovec, dipl. inž. geod. (UN)
Mentorica:	doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.
Somentor:	doc. dr. Klemen Kozmus Trajkovski, univ. dipl. inž. geod.
Naslov:	Analiza kakovosti direktnega georeferenciranja daljinsko vodenega letalnika z metodama RTK in PPK
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	60 str., 9 pregl., 53 sl., 20 en.
Ključne besede:	RTK, PPK, direktno georeferenciranje, Phantom 4 RTK, UAV

Izvleček

Direktno georeferenciranje daljinsko vodenih letalnikov (angl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) se je v zadnjih letih izpopolnilo z vgrajenimi moduli izmere RTK (angl. Real-Time Kinematic) in PPK (angl. Post-Processed Kinematic), ki omogočajo določitev položaja v realnem času ali naknadno. Obe metodi imata svoje prednosti in slabosti, a se hkrati dopolnjujeta, ko ene izmed njiju zaradi različnih situacij (npr. lastnosti terena, ne/dostopnost mobilnega omrežja ...) ni mogoče uporabiti. V raziskavi smo preizkušali letalnik Phantom 4 RTK na območju Strunjanskega klifa ob slovenski obali Jadranskega morja. Testno območje je zajemalo več snemalnih misij, katerih položaje smo določili v realnem času z navezavo na bazno postajo D-RTK 2 Mobile Station in naknadno na osnovi opazovanj GNSS z lastnih referenčnih baznih postaj v bližini snemanja. Položaje projekcijskih centrov posnetkov, pridobljene z metodama RTK in PPK, smo med sabo primerjali. Na podlagi koordinatnih razlik smo ugotavljali, ali različne lokacije baznih postaj vplivajo na kakovost rešitve PPK in ali se slednja značilno razlikuje od rešitve RTK. V članku je predstavljena tudi problematika obdelave PPK. Rezultati kažejo, da izbira lokacije bazne postaje lahko vpliva na kakovost določitve položaja UAV. Koordinatne razlike med rešitvami RTK in PPK v povprečju znašajo 0,3–8 cm v smereh *E* in *N* ter 1–6 cm v smeri *U*.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.3:528.74(043.3)
Author:	Anja Šinkovec, B.Sc.
Supervisor:	Assist. Prof. Polona Pavlovčič Prešeren, Ph.D.
Co-advisor:	Assist. Prof. Klemen Kozmus Trajkovski, Ph.D.
Title:	Positioning quality analysis of an unmanned aerial vehicle with direct georeferencing: the use of RTK and PPK methods
Document type:	Master Thesis
Scope and tools:	60 p., 9 tab., 53 fig., 20 eq.
Keywords:	RTK, PPK, direct georeferencing, Phantom 4 RTK, UAV

Abstract

In recent years, direct georeferencing of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has been perfected with built-in Real-Time Kinematic (RTK) and Post-Processed Kinematic (PPK) measurement modules, which enable real-time or subsequently positioning. Both methods have their advantages and disadvantages, but at the same time they complement each other when one of them cannot be used due to different situations (eg terrain characteristics, non / accessibility of the mobile network ...). In the research, we tested the Phantom 4 RTK aircraft in the area of the Strunjan cliff along the Slovenian coast of the Adriatic Sea. The test area included several recording missions, the positions of which were determined in real time by connecting to the D-RTK 2 Mobile Station and subsequently based on GNSS observations from our own reference base stations in the vicinity of the survey. The positions of the projection centers of the images obtained by the RTK and PPK methods were compared with each other. Based on the coordinate differences, we determined whether different locations of base stations affect the quality of the PPK solution and whether the latter differs significantly from the RTK solution. The article also presents the issue of PPK processing. The results show that the choice of base station location can affect the quality of UAV positioning. The coordinate differences between the RTK and PPK solutions average 0.3–8 cm in the *E* and *N* directions and 1–6 cm in the *U* direction.

ZAHVALA

Iskrena hvala mentorici doc. dr. Poloni Pavlovčič Prešeren in somentorju doc. dr. Klemnu Kozmusu Trajkovskemu za deljeno znanje, strokovno usmeritev in pomoč pri izdelavi zaključnega dela. Vaše spodbudne besede in pohvale so mi dajale motivacijo. Zahvaljujem se tudi g. Albinu Mencinu za pomoč pri terenskih meritvah.

Hvala vsem sošolcem za iskrive trenutke in skupna modrovanja tekom študijskih let.

Od srca hvala mojim najbližjim, predvsem staršem, ki so me opogumljali in zvesto podpirali.

»Kdor hoče videti, mora gledati s srcem. Bistvo je očem nevidno.«

Antoine de Saint-Exupéry

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA.....	IV
1 UVOD.....	1
1.1 Opis problema in delovna hipoteza	1
1.2 Povzetek preteklih raziskav	2
1.3 Struktura naloge	3
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	4
2.1 Georeferenciranje	4
2.1.1 Direktno georeferenciranje.....	4
2.2 RTK – kinematična metoda izmere v realnem času.....	5
2.2.1 Bazna postaja in možnosti prenosa podatkov.....	6
2.3 PPK – kinematična metoda izmere z naknadno obdelavo.....	7
2.3.1 Bazna postaja	8
2.4 Vloga oslonilnih točk pri metodah RTK in PPK.....	8
2.5 Phantom 4 RTK.....	10
2.5.1 Sistem GNSS.....	10
2.5.2 Časovna sinhronizacija meritev.....	11
2.5.3 Brežžične tehnologije za prenos podatkov RTCM.....	12
2.5.4 Sprejemnik D-RTK 2 Mobile Station	12
2.5.5 Podatkovne datoteke misije letalnika.....	14
2.6 Pretvorba med časovnim sistemom GPS in lokalnim časom	15
2.7 Linearna interpolacija.....	17
2.8 Koordinatni sistemi	18
2.8.1 Pravokotni koordinatni sistem (X, Y, Z)	18
2.8.2 Elipsoidni (geodetski) koordinatni sistem (φ, λ, h)	19
2.8.3 Lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U)	19
2.9 Prehod iz globalnega (G) v lokalni (LG) geodetski koordinatni sistem.....	20
2.9.1 Pretvorba iz sistema (φ, λ, h) v sistem (X, Y, Z)	20
2.9.2 Transformacija iz sistema (X, Y, Z) v sistem (E, N, U)	21

3	OPIS DELOVIŠČA IN OBDELAVA OPAZOVANJ	23
3.1	Testno območje	23
3.1.1	Snemalne misije letalnika P4RTK.....	24
3.1.2	Bazne postaje za RTK	25
3.1.3	Bazne postaje za PPK.....	27
3.2	Določitev položaja letalnika z metodo RTK	29
3.3	Določitev položaja letalnika z metodo PPK	30
3.3.1	Obdelava opazovanj GNSS	30
3.3.2	Filtriranje rešitev PPK	31
3.3.3	Pretvorba trenutkov ekspozicij iz GPS v UTC	31
3.3.4	Interpolacija rešitev PPK.....	32
3.3.5	Upoštevanje zamikov APC–CMOS	32
3.4	Predstavitev položajev letalnika v koordinatnem sistemu (E, N, U).....	33
3.5	Razlike v koordinatah RTK in PPK	34
3.5.1	Osnovne statistike.....	34
3.5.2	Grafikon kvartilov	34
4	REZULTATI IN DISKUSIJA.....	35
4.1	Položaji posnetkov snemalnih misij	35
4.2	Koordinatne razlike med RTK in PPK	40
4.2.1	Sosledja razlik v položajih posnetkov po komponentah E, N in U	41
4.2.2	Porazdeljenost koordinatnih razlik	51
5	ZAKLJUČEK	56
VIRI		57

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Vsebina datoteke Timestamp.MRK	15
Preglednica 2:	Elipsoidne koordinate baznih točk za navezavo letalnika v načinu RTK	26
Preglednica 3:	Snemalne misije z navezavo na bazne postaje za RTK.....	26
Preglednica 4:	Lastnosti GNSS-tehnologije v sprejemniku D-RTK 2 Mobile Station	27
Preglednica 5:	Elipsoidne koordinate baznih točk za navezavo letalnika v načinu PPK	27
Preglednica 6:	Snemalne misije z navezavo na bazne postaje za PPK	28
Preglednica 7:	Lastnosti GNSS-tehnologije v sprejemnikih Leica GS15 in Leica GS18 T.....	29
Preglednica 8:	Isti časovni trenutek, izpisan v različnih časovnih sistemih	31
Preglednica 9:	Podatki o snemalnih misijah ter povprečja absolutnih razlik med položaji RTK in PPK.....	40

KAZALO SLIK

Slika 1:	Določitev položaja letalnika z metodo RTK → komunikacijske linije: 1. sateliti–letalnik, 2. sateliti–bazna postaja, 3. bazna postaja–kontrolna postaja, 4. kontrolna postaja–letalnik (Wingtra, 2020).....	5
Slika 2:	Določitev položaja letalnika z metodo PPK → komunikacijske linije: 1. sateliti–bazna postaja, 2. sateliti–letalnik (Wingtra, 2020).....	7
Slika 3:	Oslonilna točka na strmem terenu.....	9
Slika 4:	Daljinsko voden letalnik Phantom 4 RTK	10
Slika 5:	Stalen razmak med faznim centrom antene GNSS (APC-center) in centrom fotoaparata (CMOS-center) pri letalniku Phantom 4 RTK (DJI, 2021a).....	11
Slika 6:	Postaja D-RTK 2 Mobile Station	13
Slika 7:	Pravokotni koordinatni sistem (X, Y, Z) in lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U) glede na elipsoidno širino φ in elipsoidno dolžino λ točke P (Jekeli, 2016)	20
Slika 8:	Testno območje (podlaga: DOF050, k. s. D96/TM, stanje 2020).....	23
Slika 9:	Testno območje – digitalni model reliefa (prostorska ločljivost: 0,5 m, azimut in višinski kot osvetlitve: 225° in 45°)	24
Slika 10:	Lokacije snemalnih misij letalnika P4RTK na dan 9. 11. 2020.....	24
Slika 11:	Lokaciji snemalnih misij letalnika P4RTK na dan 5. 3. 2021	25
Slika 12:	Bazne postaje za določitev položaja letalnika P4RTK z metodo RTK (ST2, ST3, ST4) .	26
Slika 13:	Bazne postaje za določitev položaja letalnika P4RTK z metodo PPK (ST1, A, B, C, D, F, H, I, J, K, L)	28
Slika 14:	Izsek iz datoteke Timestamp.MRK za snemalno misijo 100_0031. V stolpcih 7–9 so zapisane elipsoidne koordinate projekcijskih centrov posnetkov, določene z metodo RTK.	29
Slika 15:	Izsek iz datoteke Rinex.obs za snemalno misijo 100_0032 z označenimi napakami	31
Slika 16:	Interpolacija položaja letalnika za časovni trenutek nastanka posnetka (timestamp)	32
Slika 17:	Poprava interpoliranega položaja letalnika za vrednost zamikov med faznim centrom antene (APC) in centrom senzorja CMOS	33
Slika 18:	Prehod položajev (RTK in PPK) letalnika v lokalni koordinatni sistem preko točke ST133	
Slika 19:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0327), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.	35
Slika 20:	Izsek iz datoteke Timestamp.MRK za snemalno misijo 100_0331. Z rdečo barvo so označeni nepravilni časovni trenutki ekspozicij, katerih vrednosti izmenično padajo in naraščajo.	36

Slika 21:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0329), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo B.	36
Slika 22:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0330), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.	37
Slika 23:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0331), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.	37
Slika 24:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0017), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo I.	38
Slika 25:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0017), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo J.	38
Slika 26:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0031), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.	39
Slika 27:	Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0032), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.	39
Slika 28:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti E za snemalno misijo 100_0327 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.	42
Slika 29:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti E za snemalno misijo 100_0328 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.	42
Slika 30:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0332 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.	43
Slika 31:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti N za snemalno misijo 100_0411 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST3, rešitve PPK na bazo H.	43
Slika 32:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0328 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.	44

Slika 33:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0328 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo A)	44
Slika 34:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti N za snemalno misijo 100_0333 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo D.....	45
Slika 35:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0333 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo D)	45
Slika 36:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0412 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST3, rešitve PPK na bazo H.....	46
Slika 37:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0412 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo H)	46
Slika 38:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0022 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo J.....	47
Slika 39:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0022 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo J).....	47
Slika 40:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.....	48
Slika 41:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo ST1)	48
Slika 42:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – enotne vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo K.....	49
Slika 43:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo K)	49
Slika 44:	Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – enotne vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo L.	50
Slika 45:	Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo L).....	50
Slika 46:	Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔE) med RTK in PPK za vse snemalne misije	51
Slika 47:	Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔN) med RTK in PPK za vse snemalne misije	52

Slika 48:	Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔU) med RTK in PPK za vse snemalne misije	52
Slika 49:	Vidnost satelitov nad bazno postajo J.....	53
Slika 50:	Vidnost satelitov nad bazno postajo H	53
Slika 51:	Vidnost satelitov nad bazno postajo ST1.....	54
Slika 52:	Vidnost satelitov nad bazno postajo K	54
Slika 53:	Vidnost satelitov nad bazno postajo L.....	55

KRATICE

APC	angl. Antenna Phase Centre
CEST	angl. Central European Summer Time
CET	angl. Central European Time
CIO	angl. Conventional International Origin
CMOS	angl. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CTS	angl. Conventional Terrestrial Reference System
DOP	angl. Dilution of Precision
ECEF	angl. Earth Centered Earth Fixed
ENU	angl. East-North-Up
GCPs	angl. Ground Control Points
GDOP	angl. Geometric Dilution of Precision
GNSS	angl. Global Navigation Satellite System
GPST	angl. GPS Time
INS	angl. Inertial Navigation System
IQR	angl. Interquartile Range
NED	angl. North-East-Down
NGS	angl. National Geodetic Survey
NRTK	angl. Network RTK
NTRIP	angl. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPK	angl. Post-Processed Kinematic
RINEX	angl. Receiver Independent Exchange
RTCM	angl. Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	angl. Real-Time Kinematic
UAV	angl. Unmanned Aerial Vehicle
UT	angl. Universal Time
UTC	angl. Coordinated Universal Time

1 UVOD

1.1 Opis problema in delovna hipoteza

Na področju daljinskega zaznavanja se prostorski podatki zajemajo na daljavo z uporabo različnih platform (npr. cestna vozila, zračna in vodna plovila ...), na katerih so nameščene merilne naprave (snemalni senzorji, sistemi za pozicioniranje ...). Da bi določili položaj merjene entitete prostora, moramo najprej pridobiti informacijo o legi in orientaciji (zunanja orientacija) merilnih naprav, kar imenujemo georeferenciranje. V osnovi poznamo posredno (indirektno) in neposredno (direktno) georeferenciranje, ki se razlikujeta po načinu določitve parametrov zunanje orientacije. Čeprav je posredno georeferenciranje dobro znan in uveljavljen postopek umestitve podatkov v referenčni prostor (npr. izravnava bloka fotografij v fotogrametriji), se vse bolj izpopolnjuje direktno georeferenciranje, pri katerem parametre zunanje orientacije določimo z uporabo dodatnih naprav za pozicioniranje, kot sta sprejemnik GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) in sistem INS (angl. Inertial Navigation System). Obe napravi najdemo na daljinsko vodenih letalnikih, ki jih pogosto uporabljamo za fotogrametrična snemanja iz zraka. S tako opremljenimi letalniki lahko na terenu določimo manj oslonilnih točk (njihovo število, nameščanje, razporeditev ...), ki so sicer nujno potrebne za posredno georeferenciranje. Ker je njihova vzpostavitev organizacijsko zahtevna in v določenih primerih tudi nevarna oziroma nemogoča (npr. območja gradbišč, močvirja, visoke pečine ...), v ospredje prihajajo tehnologije, ki zmanjšujejo potrebo po vključevanju oslonilnih točk pri množičnem zajemu podatkov s fotogrametričnimi tehnikami. Aktualni postajajo letalniki z vgrajenimi moduli za izvedbo RTK in/ali PPK metode izmere za neposredno georeferenciranje. Do pred kratkim so rešitve GNSS uporabljali predvsem kot podporo pri obdelavi zajetih podatkov (integrirana orientacija senzorjev). Razvoj in implementacija večfrekvenčnih anten GNSS v letalnikih naj bi omogočala direktno določitev položaja snemalnih naprav s centimetrovsko točnostjo, kar v zadnjih letih predstavlja novo raziskovalno področje.

Na kakovost fotogrametričnih izdelkov vpliva mnogo dejavnikov (lastnosti fotoaparata, snemalna višina, število in razporeditev oslonilnih točk ...), med katere spada tudi postopek georeferenciranja zajetih posnetkov. Kadar je položaj snemalne naprave (fotoaparata) določen direktno z metodo izmere RTK ali PPK, je kakovost določitve objektnih koordinat projekcijskih centrov posnetkov enaka kakovosti izmere GNSS. Zaradi tega razloga smo se v naši raziskavi osredotočili zgolj na analizo merjenih položajev letalnika oziroma fotoaparata. Vzpostavili smo testno polje na območju Mesečevega zaliva v Strunjanu, kjer smo izvedli več snemalnih misij v jesenskem in spomladanskem času. Za zajemanje prostorskih podatkov smo uporabili letalnik Phantom 4 RTK, ki omogoča uporabo obeh načinov izmere GNSS. Položaje letalnika smo določili v realnem času z navezavo na bazno postajo D-RTK 2 Mobile Station ter naknadno z obdelavo surovih opazovanj GNSS, katerih registracija je potekala istočasno na letalniku in na baznih postajah, vzpostavljenih za določitev položaja z metodo PPK. Slednje

smo namestili na različne predele testnega območja, da bi upoštevali vpliv lokacije baze na kakovost določitve položaja letalnika. Koordinate, pridobljene z obema metodama izmere, smo primerjali in skušali rezultate smiselno interpretirati glede na lastnosti testnega območja ter metod RTK in PPK.

Cilj raziskave je bil ugotoviti, ali se rešitve RTK in PPK ob prisotnosti ovir v okolici sprejemnika GNSS med seboj značilno razlikujejo ter kateri so pomembni dejavniki, ki vplivajo na te razlike.

1.2 Povzetek preteklih raziskav

V večini do sedaj opravljenih raziskav kakovost določitve položaja letalnika z metodama izmere RTK in PPK ocenjujejo s kontrolnimi točkami. Njihove koordinate, določene na osnovi terestričnih meritev (klasične metode ali metode GNSS-izmere), primerjajo s koordinatami, pridobljenimi iz rezultatov obdelave podatkov daljinskega zaznavanja, kot opisujejo avtorji Tomašič in sod. (2019). Slednji so pokazali, da je točnost rezultatov fotogrametrične obdelave pri direktnem georeferenciranju, ko so parametri zunanje orientacije (objektne koordinate projekcijskega centra in zasuki posnetka v času ekspozicije) že določeni z eno od metod GNSS-izmere, primerljiva ali celo višja od točnosti, ki jo dosežemo z običajnimi pristopi georeferenciranja z oslonilnimi točkami¹. Ustrezno število dodatnih oslonilnih točk sicer izboljša ravninsko in višinsko točnost bloka fotografij (Kosmatin Fras in sod., 2020), a je takšen pristop na nedostopnih in nevarnih območjih nezaželen (Tomašič in sod., 2019). Kadar se odločimo za direktno georeferenciranje z metodama RTK ali PPK, oslonilnih točk teoretično ne potrebujemo, a se kljub temu za doseg optimalne točnosti in zanesljivo ocenjene goriščne razdalje priporoča uporaba vsaj ene oslonilne točke (priporočljivo v sredini bloka posnetkov), predvsem za nadirne posnetke (Taddia, Stecchi in Pellegrinelli, 2020). Nasprotno je pri poševnih posnetkih, kjer se točnosti rezultatov z uporabo oslonilnih točk in brez njih med seboj bistveno ne razlikujejo. Glede na raziskavo avtorjev Taddia, Stecchi in Pellegrinelli (2020) se višinska točnost modela občutno izboljša v primeru kombiniranja nadirnih in poševnih posnetkov brez potrebe po vključevanju oslonilnih točk. Zanimive povzetke raziskave navajata tudi Przybilla in Bäumker (2020), ki opozarjata na dokaj velike variacije v kakovosti merjenih položajev z metodo RTK in posledično njihov neposredni vpliv na določitev parametrov zunanje orientacije ter nadalje na kakovost fotogrametričnih izdelkov. Glede na pridobljene rezultate se jima direktno georeferenciranje brez oslonilnih točk ne zdi smiselno, saj so vidne znatne razlike predvsem pri višinski komponenti položaja kontrolnih točk (~100 mm). Točnost horizontalnih komponent znaša od 10 mm do 20 mm, kar je v skladu s splošno znano točnostjo določitve položaja po metodi RTK. Avtorja priporočata pristop integrirane orientacije senzorjev (kombinacija

¹ Rezultati raziskav so odvisni od značilnosti testnega območja (različna lega, metode, programska in merska oprema ...).

parametrov zunanje orientacije in manjšega števila oslonilnih točk). Metoda PPK je v smislu dosežene točnosti rezultatov primerljiva in ne znatno boljša od metode RTK (Przybilla in Bäumker, 2020).

1.3 Struktura naloge

Magistrsko delo sestavlja pet poglavij. V prvem je predstavljeno razvijajoče se področje direktnega georeferenciranja daljinsko vodenih letalnikov in na kratko opisan potek raziskave z oblikovano hipotezo. Navedeni so tudi izsledki sorodnih študij ter struktura naloge. Drugi del je namenjen teoretičnim osnovam v zvezi z uporabljenim letalnikom Phantom 4 RTK in vgrajenimi moduli za določitev njegovega položaja z metodama RTK in PPK. Poleg tega so zapisana izhodišča za naknadno obdelavo meritev in predstavitev rezultatov. Terenska izmera je obširneje pojasnjena v tretjem poglavju, v katerega je vključen tudi podroben opis postopka naknadne obdelave opazovanj GNSS ter analize rešitev RTK in PPK. V četrtem poglavju smo pojasnili dobljene razlike v položajih letalnika in na osnovi ugotovitev oblikovali zaključke za peto poglavje.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Georeferenciranje

Georeferenciranje je postopek umestitve podatkov v referenčni prostor oziroma koordinatni sistem, ki je lahko lokalni, državni ali globalni. V procesu fotogrametričnega zajema prostorskih podatkov moramo za namen georeferenciranja poznati parametre zunanje orientacije, ki definirajo lego in orientacijo senzorja v trenutku, ko nastane posnetek. Med parametre zunanje orientacije spada šest elementov, ki jih sestavljajo tri objektne koordinate projekcijskega centra (X_0 , Y_0 , Z_0) ter trije koti zasuka posnetka (ω , φ , κ) v času ekspozicije. Omenjene parametre lahko določimo posredno, z različnimi metodami aerotriangulacije, ki so odvisne od terenskih meritev oslonilnih točk, ali neposredno, z direktnim georeferenciranjem, pri čemer terenskih meritev načeloma ne potrebujemo, saj se parametri izračunajo iz meritev različnih senzorjev. Slednji princip uporabljajo različne sodobne tehnologije kot so na primer daljinsko vodeni letalniki, mobilni merilni sistemi, lasersko skeniranje ... (Bric, Grigillo, Kosmatin Fras, 2017; Kosmatin Fras, 2019a).

2.1.1 Direktno georeferenciranje

Direktno georeferenciranje temelji na neposredni (direktni) določitvi parametrov zunanje orientacije z uporabo dodatnih merilnih naprav. Glavni napravi sta sprejemnik GNSS in inercialni navigacijski sistem (INS).

V sistem INS so vgrajeni žiroskopi in pospeškometri, ki zaznavajo gibanje nosilca, ter podporna elektronika in računalnik za izvedbo integracij merjenih podatkov. Žiroskop je senzor za določanje zasukov, pospeškometer pa senzor za merjenje pospeškov. Primarna funkcija sistema INS je orientacija merilnih naprav (npr. digitalni fotoaparati) v trirazsežnem prostoru. Namenjen je tudi kot podpora v primeru izgube signala GNSS ali za natančno interpolacijo položaja med GNSS-meritvami (Kosmatin Fras, 2019b; Kozmus Trajkovski, 2019).

Sprejemnik GNSS je primarno namenjen določitvi položaja merilnih naprav, ki temelji na opazovanju psevdorazdalj oziroma merjenju časa potovanja signala od satelita do sprejemnika. Njegova sekundarna vloga je lahko preverjanje in popravljanje INS-napake, časovna sinhronizacija meritev idr. (Kosmatin Fras, 2019b).

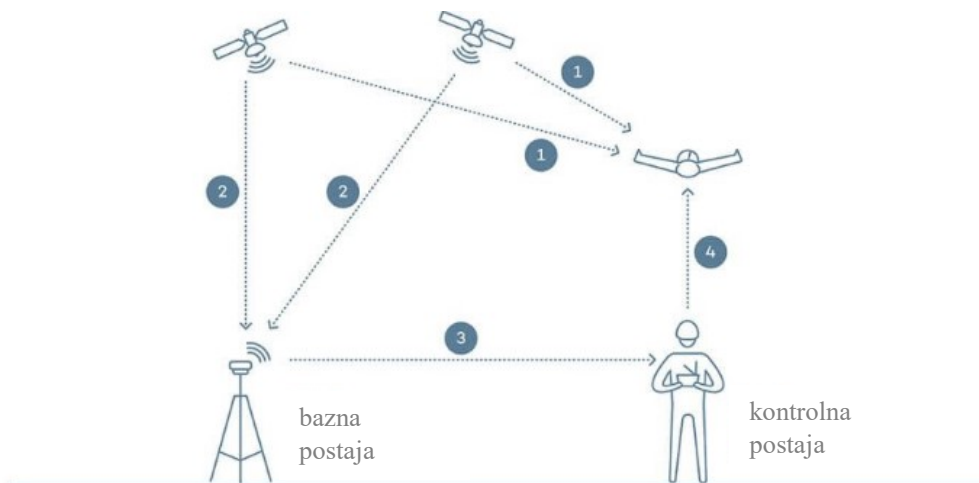
Direktno georeferenciranje zaenkrat še ne dosega enake natančnosti kot aerotriangulacija. V zadnjem času proizvajalci daljinsko vodenih letalnikov nadgrajujejo GNSS-tehnologijo za pozicioniranje snemalnih naprav. Trenutno sta aktualni dve kinematični metodi izmere GNSS, to sta RTK in PPK. Prva

omogoča pošiljanje popravkov opazovanj in določitev položaja letalnika v realnem času, pri drugi metodi pa točen položaj pridobimo z naknadno obdelavo opazovanj (Kosmatin Fras, 2019b; Tomašič in sod., 2019).

2.2 RTK – kinematična metoda izmere v realnem času

Metoda RTK spada med relativne načine določitve položaja, zato za izvedbo potrebujemo dva sprejemnika GNSS. Eden od njiju je statičen, kar pomeni, da med izmero ves čas miruje na znani (referenčni) točki, drugi pa je mobilni in ga lahko poljubno premikamo. Položaj mobilnega sprejemnika je določen relativno glede na referenčno postajo, ki mobilnemu sprejemniku v realnem času posreduje podatke opazovanj in/ali popravke opazovanj v obliki sporočila RTCM (angl. Radio Technical Commission for Maritime Services; Stopar, 2017a).

Način RTK-izmere uporabljajo tudi daljinsko vodeni letalniki, za katere se omenjena metoda v zadnjih letih izpopolnjuje. Problem predstavlja zanesljivost povezave od referenčne postaje do letalnika. Običajno se popravki opazovanj od bazne postaje posredujejo direktno na letalnik, kar poveča tveganje za trenutno izgubo signala. Novejši pristopi za prenos popravkov uporabljajo vmesno napravo, tj. zemeljsko kontrolno postajo, ki sprejme popravke od bazne postaje in jih posreduje letalniku (Vision Aerial, 2021).



Slika 1: Določitev položaja letalnika z metodo RTK → komunikacijske linije: 1. sateliti–letalnik, 2. sateliti–bazna postaja, 3. bazna postaja–kontrolna postaja, 4. kontrolna postaja–letalnik (Wingtra, 2020)

V splošnem moramo za določitev položaja letalnika v realnem času zagotoviti štiri stalne komunikacijske linije med (Wingtra, 2020):

1. sateliti in daljinsko vodenim letalnikom,
2. sateliti in bazno postajo (referenčna postaja GNSS ali omrežje stalno delujočih postaj),

3. bazno postajo (referenčna postaja GNSS ali omrežje stalno delujočih postaj) in kontrolno postajo ter
4. kontrolno postajo in daljinsko vodenim letalnikom.

GNSS-sprejemnik, ki je pritrjen na letalnik, opravlja vlogo mobilnega sprejemnika, ki med letom sprejema opazovanja s satelitov in opazovanja oziroma popravke z referenčne postaje. Slednji izboljšajo točnost položaja na nekaj centimetrov. Pri tem mora biti zagotovljena neprekinjena povezava od referenčne postaje preko kontrolne postaje do letalnika. V realnih pogojih to ni vedno mogoče. Naravne ali umetne ovire lahko povzročijo prekinitve v komunikaciji. Problematična so tudi območja s šibko internetno povezavo oziroma slaba pokritost določenega mobilnega omrežja (Wingtra, 2020).

2.2.1 Bazna postaja in možnosti prenosa podatkov

Pri metodi RTK lahko vlogo bazne postaje zavzame lastna referenčna postaja GNSS ali omrežje stalno delujočih postaj (v Sloveniji omrežje SIGNAL ali SmartNet). Prednost uporabe omrežij je, da potrebujemo le en (mobilni) sprejemnik GNSS, saj referenčno postajo nadomešča stalna GNSS-postaja ali VRS-postaja. Takšen način določanja položaja imenujemo tudi NRTK (angl. Network RTK). Pri postavitvi lastne bazne postaje smo neodvisni od ponudnikov storitev prenosa podatkov RTCM (Stopar, 2017a; Placing the base, 2021).

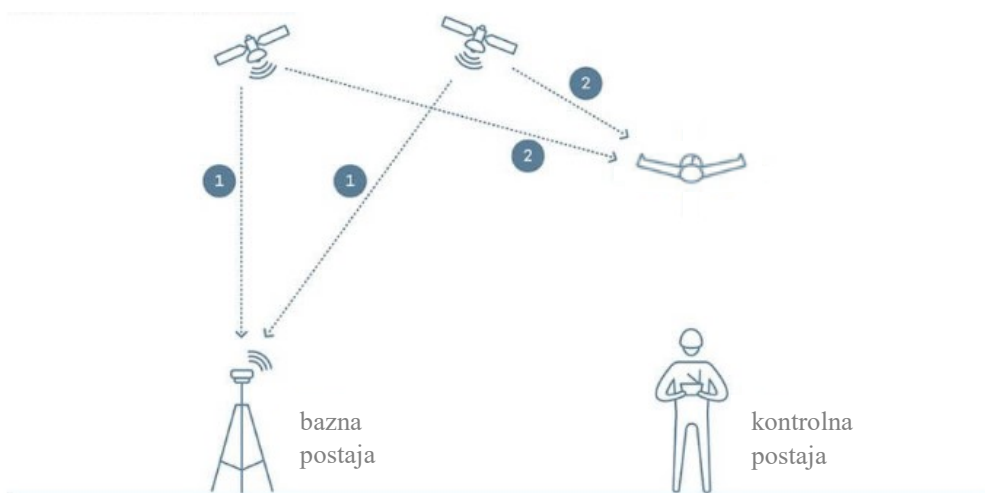
Kadar uporabljamo omrežje stalno delujočih postaj, moramo za prenos podatkov RTCM obvezno imeti omogočen dostop do svetovnega spleta (npr. mobilni internet, Wi-Fi ...), kar imenujemo protokol NTRIP (angl. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) ali možnost klicnega dostopa – GSM-dostop (Omrežje SIGNAL, 2021). Protokol NTRIP običajno uporabljamo tudi v primeru lastne referenčne postaje. Nekatere bazne postaje so zmožne posredovati podatke brez internetne povezave oziroma preko drugih vrst brezžične komunikacije (glej poglavje 2.5.3).

Pri uporabi lastne bazne postaje moramo biti pozorni na njeno ustrezno postavitvev. Običajno jo lociramo na točko z znanim položajem. V tem primeru je točnost zajetih podatkov odvisna od točnosti določitve položaja dane točke v predhodnih izmerah. Če za bazo vzamemo točko z neznanimi koordinatami, se moramo zavedati, da z izmero RTK ne moremo pričeti takoj ob prihodu na teren, saj je v vsakem primeru potrebno določiti položaj bazne postaje. Točnost njene določitve in hitrost pridobljene rešitve je odvisna od izbrane metode izmere GNSS, kot je npr. statična, RTK, PPP ... (Placing the base, 2021).

2.3 PPK – kinematična metoda izmere z naknadno obdelavo

Metoda PPK je alternativa metodi RTK. Glavna razlika med njima je v času pridobitve rezultatov. Pri PPK položaj opazovane točke ne določimo v realnem času, kot velja za RTK, ampak ga pridobimo kasneje, ko izvedemo naknadno obdelavo opazovanj GNSS. Metodi sta glede na način določitve položaja in dinamiko izmere enaki. Relativen način določitve položaja tudi pri PPK pomeni uporabo dveh sprejemnikov GNSS, od katerih je eden statično lociran na znani točki (referenčna postaja), drugi pa je v gibanju (mobilni sprejemnik). Oba sprejemnika beležita surova opazovanja GNSS, ki so pretvorjena v datoteke formata RINEX (angl. Receiver Independent Exchange) za naknadno obdelavo z namenom določitve položaja z želeno točnostjo. Pomembno je, da opazovanja z referenčne postaje časovno pokrivajo opazovanja mobilnega sprejemnika, saj v nasprotnem obdelava oziroma določitev opazovanih položajev ni mogoča. Na terenu naj bi bila referenčna postaja tista, ki jo moramo kot prvo namestiti in kot zadnjo odstraniti (How PPK works, 2021).

Tehnika PPK se uporablja predvsem pri kartiranju oziroma aerosnemanju z daljinsko vodenim letalnikom. V primerjavi z RTK omogoča bolj prilagodljiv potek dela, saj lahko opazovanja GNSS obdelamo večkrat z različnimi nastavitvami. Je tudi zanesljivejša metoda določitve položaja, saj telemetrična povezava med bazno postajo in letalnikom ni potrebna (pri RTK so možne prekinitve v povezavi, ki povzročijo izgubo popravkov in posledično pridobimo napačen položaj). Uporabimo jo lahko kot rezervno možnost izmere, kadar RTK-metoda zataji (Wingtra, 2020; How PPK works, 2021).



Slika 2: Določitev položaja letalnika z metodo PPK → komunikacijske linije: 1. sateliti–bazna postaja, 2. sateliti–letalnik (Wingtra, 2020)

Za določitev položaja letalnika v načinu PPK potrebujemo dve stalni komunikacijski liniji med (Wingtra, 2020):

1. sateliti in bazno postajo (referenčna postaja GNSS ali omrežje stalno delujočih postaj) ter
2. sateliti in daljinsko vodenim letalnikom.

Če letalnik opravlja misijo v načinu PPK, se do mobilnega sprejemnika v realnem času ne posredujejo popravki opazovanj, zato komunikacijska povezava med bazno postajo preko kontrolne postaje do letalnika ni potrebna. Zagotovljena mora biti le povezava med kontrolno postajo in letalnikom za njuno medsebojno komunikacijo med letom. Po opravljeni izmeri moramo opazovanja GNSS z bazne postaje in letalnika najprej pregledati in obdelati z ustrezno programsko opremo (npr. Leica Infinity, RTKLib, Trimble Business Center ...), da pridobimo koordinate zajetih podatkov (npr. posnetkov) v trenutku njihovega nastanka (Wingtra, 2020).

2.3.1 Bazna postaja

Opravljanje meritev po metodi PPK nam pri izbiri bazne postaje ponuja dve možnosti. Datoteke RINEX, ki vsebujejo podatke z opazovanji, lahko pridobimo z lastne referenčne postaje GNSS ali s stalno delujočih postaj GNSS izbranega omrežja. Ker se vsa opazovanja obdelajo naknadno, internetna povezava v času izmere ni potrebna.

Najmanj merske opreme (le mobilni sprejemnik) potrebujemo za navezavo na omrežje, pri čemer dano točko predstavlja ena od stalno delujočih postaj GNSS ali postaja VRS, ki se ustvari na zahtevo uporabnika. Za kakovostno določitev položaja izberemo stalno postajo, ki se nahaja čim bližje delovišča ali pa uporabimo opazovanja (še bližje) virtualne postaje VRS, ki so izračunana na osnovi dejanskih opazovanj stalnih postaj (Omrežje SIGNAL, 2021; PPK Base Station, 2021).

Če imamo na voljo dodaten sprejemnik GNSS in se v bližini nahaja točka z znanimi koordinatami, lahko za bazo uporabimo lastno referenčno postajo. Ob prihodu na teren jo postavimo na znano točko in pričnemo z registracijo opazovanj. Bazno postajo lahko vzpostavimo tudi na neznani točki, saj je njen položaj možno določiti naknadno. Z namenom pridobitve čim bolj točnega položaja, je priporočljiv čas trajanja izmere najmanj ena ura. Daljši čas trajanja opazovanj poveča zanesljivost določitve faznih nedoločenosti in omogoča zmanjšanje ali odstranitev nekaterih vplivov na opazovanja. Podatke RINEX z bazne postaje v naknadni obdelavi uporabimo dvakrat. Prvič, da določimo koordinate baze (neznana točka), in drugič, da z metodo PPK pridobimo položaje premičnega sprejemnika (Stopar, 2017a; PPK Base Station, 2021).

2.4 Vloga oslonilnih točk pri metodah RTK in PPK

V klasični aerotriangulaciji se za orientacijo posnetkov v prostoru uporablja oslonilne točke (angl. Ground Control Points, GCPs), ki imajo znane koordinate, določene z metodami GNSS ali s klasičnimi geodetskimi metodami. Njihova uporaba je dobro znana, saj zagotavljajo doslednost in točnost podatkov. Potrebujemo jih pri vsakem projektu, a je njihova vzpostavitev organizacijsko zahtevna,

zaradi česar v ospredje prihajajo druge metode georeferenciranja (predvsem direktnega georeferenciranja), pri katerih se število oslonilnih točk zmanjšuje zaradi uporabe senzorjev za geolociranje in orientacijo. V več raziskavah so ugotovili, da se točnost posredne orientacije posnetkov z vključevanjem dodatnih oslonilnih točk izboljšuje. Za doseg optimalne ravninske in višinske točnosti jih potrebujemo večje število (približno dvajset), kar povzroči več dodatnega dela na terenu (Kosmatin Fras in sod., 2020). Na težko dostopnih ali nedostopnih območjih (npr. gradbišče, močvirja, visoke pečine ...) je postavitve oslonilnih točk tudi nevarna oziroma nemogoča. V takšnih primerih lahko uporabimo daljinsko vodene letalnike z vgrajeno metodo izmere RTK ali PPK za neposredna georeferenciranja (Vision Aerial, 2021; Kregar in Lazar, 2018).



Slika 3: Oslonilna točka na strmem terenu

Pri postavitvi oslonilnih točk je pomembna njihova količina, vizualna kakovost in razporeditev. Število potrebnih točk je odvisno od velikosti območja snemanja in višine leta. Z zniževanjem snemalne višine se ločljivost posnetka povečuje, količina zajetega območja na njem pa zmanjšuje. Posledično potrebujemo več oslonilnih točk. Tudi vrsta signalizacije vpliva na točnost projekta. Tarče morajo biti dovolj velike in z natančno definiranim centrom za enostaven in jasen zajem na posnetkih. Pri razporeditvi oslonilnih točk moramo paziti, da so te enakomerno nameščene na robovih območja in v njegovi notranjosti. Na ta način se izognemo ekstrapolaciji (izbočenje oziroma vbočenje posnetkov). Omenjena načela veljajo tudi pri snemanju z letalniki, ki imajo možnost direktnega georeferenciranja posnetkov (modul RTK in/ali PPK), a je zahtevano število oslonilnih točk precej manjše (najmanj tri), njihova razporeditev pa nima bistvenega pomena. Nasprotno je s kakovostjo signalizacije, ki ostaja vedno enako pomembna ne glede na vrsto uporabljenega letalnika (Aerotas, 2021c).

2.5 Phantom 4 RTK

Daljinsko voden letalnik Phantom 4 RTK (P4RTK) je razvilo kitajsko tehnološko podjetje DJI (Dajiang Innovations) s sedežem v mestu Shenzhen, v obalni provinci Guangdong na jugu Kitajske. Trenutno velja za vodilnega proizvajalca letalnikov za namen fotografiranja in snemanja iz zraka. Letalniki iz serije Phantom so bili vse do predstavitve produkta Phantom 4 RTK v oktobru 2018 izdelani predvsem za poklicno in ljubiteljsko fotografiranje (Przybilla in Bäumker, 2020; DJI, 2021c). Phantom 4 RTK je bil zasnovan za natančno kartiranje območij, kot so na primer gradbišča. Za namen neposrednega georeferenciranja ima vgrajena dva modula, RTK in PPK, s katerima je možno doseči centimetrsko natančnost merjenih položajev. Glede na tehnične karakteristike letalnika naj bi točnost pozicioniranja v načinu RTK znašala $1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ v horizontalni in $1,5\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ v vertikalni smeri. Izmero RTK priporočajo na območjih, kjer je možno v realnem času vzpostaviti povezavo preko mobilnega omrežja 4G ali sistema OcuSync. Kadar te možnosti nimamo, je smiselna naknadna obdelava opazovanj GNSS, kar omogoča način PPK (DJI, 2021b).

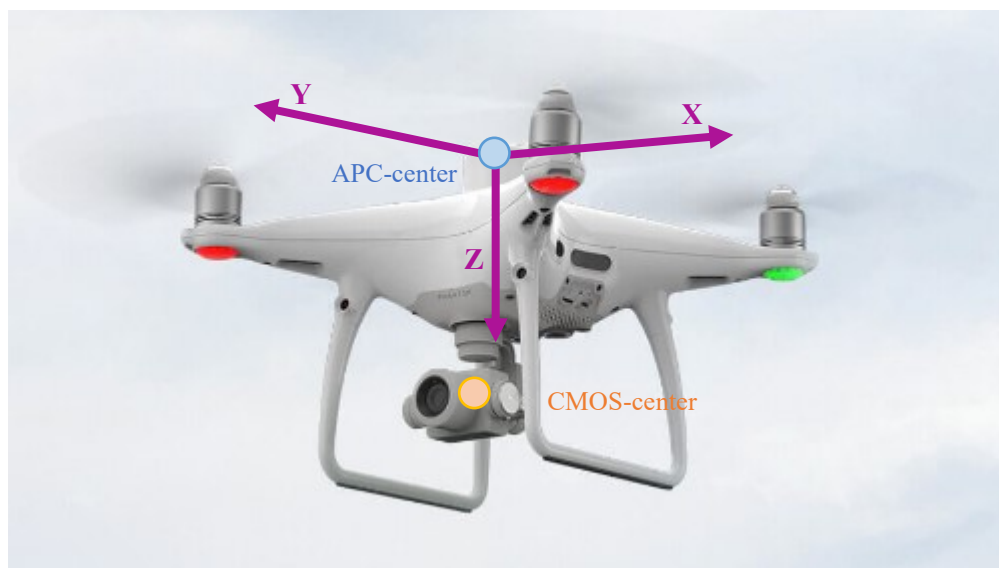


Slika 4: Daljinsko voden letalnik Phantom 4 RTK

2.5.1 Sistem GNSS

Letalnik P4RTK ima na vrhu platforme vgrajeno večfrekvenčno anteno GNSS, ki lahko sprejema signale s satelitskih sistemov NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou. Potreben čas za določitev faznih nedoločenosti znaša manj kot 50 s. Ker se vsa opazovanja GNSS nanašajo na fazni center antene (angl. Antenna Phase Centre, APC) in ne na projekcijski center slikovnega senzorja CMOS (angl. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), moramo za določitev položaja posameznega posnetka upoštevati zamike med obema sistemoma. Konstanten razmak med anteno GNSS in fotoaparatom v smeri leta (Δy) znaša $0,036\text{ m}$, v vertikalni smeri (Δz) $0,192\text{ m}$, pravokotno glede na

smer leta (Δx) pa zamika ni (0,000 m). Vse tri vrednosti so podane v koordinatnem sistemu platforme oziroma letalnika (DJI Enterprise, 2021).



Slika 5: Stalen razmak med faznim centrom antene GNSS (APC-center) in centrom fotoaparata (CMOS-center) pri letalniku Phantom 4 RTK (DJI, 2021a)

Kadar letalnik meri v načinu RTK, je položaj posnetka določen kot položaj faznega centra antene, popravljen za izračunane vrednosti zamikov med anteno GNSS in slikovnim senzorjem v trenutku ekspozicije. Ti položaji so v obliki geodetskih oziroma elipsoidnih koordinat zapisani v datoteki Timestamp.MRK. Datoteka vsebuje tudi vrednosti zamikov po posamezni komponenti koordinatnega sistema NED (angl. North-East-Down), ki so namenjene popravljanju položajev, pridobljenih z naknadno obdelavo opazovanj GNSS po metodi PPK. Njene rešitve so vezane na fazni center antene. Višinsko komponento (elipsoidna višina) lahko popravimo neposredno, horizontalni komponenti (elipsoidna širina in elipsoidna dolžina) pa ne, saj sta običajno podani v kotnih stopinjah. Zaradi neusklajenosti merskih enot (zamiki so podani v dolžinski enoti milimeter), moramo najprej opraviti pretvorbo horizontalnih komponent v izbrani kartezični koordinatni sistem, kot je na primer ENU (angl. East-North-Up; glej poglavje 2.8.3; DJI Enterprise, 2021).

2.5.2 Časovna sinhronizacija meritev

Meritve različnih merilnih sistemov morajo biti časovno usklajene, kar pomeni, da se merjeni podatki nanašajo na isti časovni trenutek. Letalnik P4RTK ima za ta namen vgrajen sistem TimeSync, ki poskrbi, da za trenutek, v katerem nastane posnetek, zabeleži tudi prostorski položaj tega posnetka oziroma njegovega projekcijskega centra. Sistem za sinhronizacijo prispeva k položajni točnosti posnetkov (DJI, 2021b).

2.5.3 Brežžične tehnologije za prenos podatkov RTCM

Za določitev relativnega položaja z metodo RTK potrebujemo telemetrično povezavo med referenčnim in mobilnim sprejemnikom. Sporočilo RTCM se lahko posreduje po različnih sistemih za prenos podatkov, kot so omrežja mobilne telefonije, ki od tehnologije 3G naprej omogočajo dostop do mobilnega interneta, mobilno dostopne točke Wi-Fi, radijske zveze, komunikacijski sateliti ... Danes se uporabljajo predvsem internetne povezave, po katerih se podatki RTCM prenašajo v skladu s protokolom NTRIP (Ocalan in Tunalioglu, 2010).

Kadar internetne povezave nimamo, je v primeru uporabe letalnika P4RTK možna povezava preko sistema OcuSync, ki prav tako omogoča prenos podatkov za določitev položaja v realnem času. Ta način komunikacije deluje, če za bazo letalnika vzamemo posebno referenčno postajo D-RTK 2 Mobile Station. Slednja poleg sistema OcuSync podpira tudi povezave preko interneta (4G, Wi-Fi in LAN). Sistem OcuSync je sicer namenjen stabilnemu ter zanesljivemu prenosu slik in videoposnetkov na razdaljah do 7 km (DJI, 2021a; Avetics Global, 2021).

Določitev položaja letalnika P4RTK v realnem času zahteva pošiljanje podatkov RTCM. Ti se lahko posredujejo na tri različne načine, in sicer preko (DJI, 2021b):

1. sistema OcuSync – navezava na referenčno postajo D-RTK 2 Mobile Station,
2. mobilnega omrežja 4G s protokolom NTRIP – navezava na omrežje stalno delujočih postaj GNSS in
3. dostopne točke Wi-Fi s protokolom NTRIP – navezava na omrežje stalno delujočih postaj GNSS (v Evropi še ni na voljo).

2.5.4 Sprejemnik D-RTK 2 Mobile Station

D-RTK 2 Mobile Station je natančen sprejemnik GNSS podjetja DJI, ki ga lahko uporabljamo v vlogi premičnega sprejemnika ali referenčne postaje. Podpira sprejem signalov s satelitskih sistemov NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou. Instrument ima vgrajeno visoko ojačitveno anteno, ki naj bi omogočala boljši sprejem signala z več satelitov. Kot referenčna postaja je kompatibilen z več letalniki podjetja DJI, med katere spada tudi P4RTK. Sočasno lahko nanj povežemo do pet kontrolnih postaj oziroma letalnikov (Avetics Global, 2021).

Položaji posnetkov letalnika P4RTK so lahko ob pravilni uporabi referenčne postaje D-RTK 2 Mobile Station določeni z visoko natančnostjo, a nizko točnostjo (Aerotas, 2021a). Vzrok za to je v sami postaji, katere glavni namen je pošiljanje podatkov opazovanj in/ali njihovih popravkov do letalnika, na katerem se v realnem času z izračuni meritev RTK določi natančna lokacija posnetkov. Poudarek je na besedi

natančno, saj metodologija izračuna zagotavlja, da je relativna točnost med bazno postajo in letalnikom visoka (visoka natančnost), medtem ko se absolutni položaj lahko razlikuje za nekaj metrov (nizka točnost). Takšne težave moramo rešiti z ustrezno fotogrametrično obdelavo podatkov v pisarni (Aerotas, 2021b).



Slika 6: Postaja D-RTK 2 Mobile Station

Postaje D-RTK 2 Mobile Station običajno ne postavljamo na točko z znanimi koordinatami, saj ne daje zadovoljivih rezultatov. Čeprav omogoča različne načine meritev (bazni/premični sprejemnik), njena programska oprema ni najboljše zasnovana, zato jo je smiselno koristiti zgolj za posredovanje podatkov RTCM do letalnika. V ostalih nalogah je boljše uporabiti druge komercialne instrumente kot so instrumenti podjetij Leica Geosystems AG, Trimble Inc ... Problematična sta tudi trinožni aluminijasti stativi in dozna libela, ki nista najboljše kakovosti, a zato ne vplivata na točnost relativnega pozicioniranja (Aerotas, 2021b).

2.5.5 Podatkovne datoteke misije letalnika

Zajeti posnetki in datoteke s podatki o položaju letalnika se med misijo oziroma poletom shranjujejo na spominsko kartico, kjer so razvrščeni po mapah. Vsaka mapa ima svoje ime v obliki zaporedne številke, kot je na primer 100_0001. Znotraj mape so zbrani posnetki v formatu JPG ter naslednje datoteke s podatki o pozicioniranju v realnem času in za naknadno obdelavo (DJI Enterprise, 2021):

1. EVENTLOG.bin (ekspozicije),
2. PPKRAW.bin (surova opazovanja GNSS in oddane efemeride),
3. Rinex.obs (opazovanja GNSS v formatu RINEX) in
4. Timestamp.MRK (ekspozicije, zamiki med napravami merilnega sistema, elipsoidne koordinate RTK-izmere ...).

V binarni datoteki EVENTLOG.bin so zapisani časi osvetlitve slikovnega senzorja oziroma časi nastanka posnetkov.

Datoteka PPKRAW.bin vsebuje surova opazovanja GNSS in oddane efemeride, ki jih prejme letalnik. Glede na tip zapisa jo uvrščamo med binarne datoteke. Podatki so shranjeni v formatu RTCM (verzija 3), ki jih lahko pretvorimo v format RINEX za naknadno obdelavo. Surova opazovanja GNSS v obliki RTCM shranjuje tudi postaja D-RTK 2 Mobile Station. Do njih lahko dostopamo le s posebnim programom za izvoz DJI Assistant 2.

Letalnik P4RTK med letom surova opazovanja GNSS pretvori v od sprejemnika neodvisen format RINEX (verzija 3) in jih zapiše v datoteko Rinex.obs. Slednjo lahko neposredno uporabimo pri naknadni obdelavi opazovanj po metodi PPK, a moramo opozoriti, da so v datoteki prisotne nekatere anomalije, ki jih moramo za nemoteno obdelavo predhodno odpraviti (glej poglavje 3.3.1).

V datoteki Timestamp.MRK so združeni rezultati izmere RTK in podatki, ki jih nujno potrebujemo, da pridobimo pravilne rezultate po metodi PPK. Vsebina je razdeljena na trinajst stolpcev (preglednica 1), število vrstic pa je odvisno od števila zajetih posnetkov. V prvem stolpcu so zapisane zaporedne številke zajetih posnetkov. Drugi in tretji stolpec podajata informacijo o trenutku nastanka posnetkov, izraženem v času GPS (oblika zapisa: GPS-teden in sekunde GPS-tedna), ki se od časa UTC (angl. Coordinated Universal Time; UTC±00:00) razlikuje za 18 sekund. V naslednjih treh stolpcih so zabeleženi odmiki centra senzorja CMOS glede na fazni center antene GNSS (APC), ki se nanašajo na koordinatni sistem NED. Kadar se center senzorja CMOS nahaja severno (*N*) ali vzhodno (*E*) od faznega centra antene, so vrednosti zamikov v teh smereh pozitivne, v primeru južne ali zahodne smeri pa negativne. Slikovni senzor je pri letalniku P4RTK nameščen nižje od antene GNSS, zato ima zamik v vertikalni smeri (*D*) vedno pozitivno vrednost. V sedmem, osmem in devetem stolpcu so podane elipsoidne koordinate

(φ_{RTK} , λ_{RTK} , h_{RTK}) projekcijskih centrov posnetkov, pridobljene z metodo RTK v trenutku ekspozicije. Elipsoidna višina se nanaša na referenčni elipsoid WGS84. Poleg položajnih vrednosti so zabeleženi tudi njihovi standardni odkloni, ki opisujejo relativno točnost pozicioniranja v načinu RTK. V zadnjem stolpcu je zapisana vrsta pridobljenega položaja (DJI Enterprise, 2021).

Preglednica 1: Vsebina datoteke Timestamp.MRK

Številka stolpca	Vsebina
1	zaporedna številka posnetka
2	GPS-sekunde tedna [s]
3	GPS-teden
4	zamik APC-CMOS v smeri <i>N</i> [mm]
5	zamik APC-CMOS v smeri <i>E</i> [mm]
6	zamik APC-CMOS v smeri <i>D</i> [mm]
7	elipsoidna širina (φ_{RTK}) senzorja CMOS [°]
8	elipsoidna dolžina (λ_{RTK}) senzorja CMOS [°]
9	elipsoidna višina (h_{RTK}) senzorja CMOS [m]
10	standardni odklon v smeri <i>N</i> [m]
11	standardni odklon v smeri <i>E</i> [m]
12	standardni odklon v smeri <i>D</i> [m]
13	vrsta določitve položaja: • 0 – ni rešitve • 16 – absolutna določitev položaja • 34 – RTK-rešitev (FLOAT) • 50 – RTK-rešitev (FIXED)

2.6 Pretvorba med časovnim sistemom GPS in lokalnim časom

Čas lahko predstavimo na različne načine. Pri obdelavi opazovanj GNSS moramo poznati razliko med časovnima sistemoma GPS in UTC, saj je registracija meritev vezana na čas GPS, ki ni v skladu z lokalnim časom nekega območja na Zemlji, kjer dejansko opravimo meritev. UTC je oznaka za koordinirani univerzalni čas, ki je osnova za splošno priznan pasovni čas, katerega uporabljamo v javnem življenju. V Sloveniji velja srednjeevropski čas (angl. Central European Time, CET), ki je eno uro pred UTC-časom (časovni zamik UTC+01:00). Poleti se z namenom izkoriščanja dnevne svetlobe privzame srednjeevropski poletni čas (angl. Central European Summer Time, CEST), kar pomeni, da se pasovni čas poveča za eno uro (časovni zamik UTC+02:00). Lokalni čas je torej enak času UTC, ki ga prilagodimo za izbran časovni pas in letni čas (Kuhar, 2019).

UTC je atomski čas, kar pomeni, da se vzdržuje na atomskih urah. Obenem je povezan tudi s svetovnim časom UT (angl. Universal Time; srednji sončev čas), ki je določen na osnovi vrtenja Zemlje. Zaradi neusklajenosti atomskega časa z Zemljino rotacijo se pri UTC uvajajo prestopne sekunde. S tem se UTC periodično usklajuje s svetovnim časom (UT1), njuna absolutna razlika pa nikoli ne preseže 0,9 s. Čas GPS (angl. GPS Time, GPST) je realiziran le na osnovi atomskih ur, ki so del sistema GPS (sistemski čas). Vzpostavljen je bil 6. januarja 1980 ob polnoči (00:00), ko je bil še usklajen s časom UTC. Ker ni obremenjen s prestopnimi sekundami, se razlika med časoma GPS in UTC povečuje ter trenutno znaša 18 s (Jekeli, 2016).

Sistemski čas GPS se šteje v GPS-tednih in sekundah GPS-tedna. Za pretvorbo v lokalni čas moramo najprej določiti koledarski datum in čas prvega dne GPS-tedna, ki se začne v noči s sobote na nedeljo (Stopar, 2017b):

$$GPS_{WeekStart} = GPS_{Week} = YYYY-MM-DD 00:00:00 \quad (1)$$

$GPS_{WeekStart}$ – datum in čas prvega dne GPS-tedna

GPS_{Week} – GPS-teden [/]

YYYY-MM-DD – standardni zapis datuma (leto, mesec, dan)

Nato sledi pretvorba sekund GPS-tedna v dneve, ure, minute in sekunde (Unit Conversions, 2021):

$$\frac{GPS_{SecondsOfWeek}}{86400 \frac{s}{day}} = GPS_{DayOfWeek} + d_{dec} \quad (2)$$

$$\frac{d_{dec} \cdot 86400 \frac{s}{day}}{3600 \frac{s}{h}} = d_{dec} \cdot 24 \frac{h}{day} = hh + h_{dec} \quad (3)$$

$$\frac{h_{dec} \cdot 3600 \frac{s}{h}}{60 \frac{s}{min}} = h_{dec} \cdot 60 \frac{min}{h} = mm + m_{dec} \quad (4)$$

$$m_{dec} \cdot 60 \frac{s}{min} = ss + s_{dec} \quad (5)$$

$GPS_{SecondsOfWeek}$ – sekunde GPS-tedna [s]

$GPS_{DayOfWeek}$ – zaporedni dan v GPS-tednu; (0 = nedelja ... 6 = sobota)

d_{dec} – decimalni del dneva

hh – število polnih ur [h]

h_{dec} – decimalni del ure [h]

mm – število polnih minut [min]

m_{dec} – decimalni del minute [min]

ss – število polnih sekund [s]

s_{dec} – decimalni del sekunde [s]

Datum v enačbi (1) popravimo v skladu z zaporednim dnevom v GPS-tednu iz enačbe (2). Časovne vrednosti (ure, minute, sekunde) v enačbi (1) pa nadomestimo z vrednostmi iz enačb (3), (4) in (5):

$$GPS_{Timestamp} = YYYY-MM-DD hh:mm:ss \quad (6)$$

$GPS_{Timestamp}$ – datum in čas (čas GPS)

$hh:mm:ss$ – standardni zapis dnevnega časa (ure, minute, sekunde)

Popravljeni količini sta še vedno vezani na časovni sistem GPS. Če ju želimo obravnavati v času UTC, moramo upoštevati prestopne sekunde:

$$UTC_{Timestamp} = GPS_{Timestamp} - ss_{LeapSeconds} \quad (7)$$

$UTC_{Timestamp}$ – datum in čas (čas UTC)

$ss_{LeapSeconds}$ – število polnih prestopnih sekund [s]

Za dokončno pretvorbo v lokalni čas moramo vrednosti prilagoditi še za ustrezen časovni pas (in letni čas) glede na UTC:

$$UTC_{LocalTimestamp} = UTC_{Timestamp} \pm UTC_{Offset} \quad (8)$$

$UTC_{LocalTimestamp}$ – datum in čas prilagojena za časovni zamik glede na UTC

UTC_{Offset} – časovni zamik glede na UTC (npr. +01:00)

2.7 Linearna interpolacija

V mnogih praktičnih primerih obravnavamo merjeni količini x in y , pri čemer so vrednosti odvisne spremenljivke y enolično določene z vrednostmi neodvisne spremenljivke x . Njuno medsebojno odvisnost lahko zapišemo v obliki preslikave ali funkcije $y = f(x)$, ki je sicer ne poznamo oziroma so njene vrednosti znane le v posameznih merjenih točkah. Da bi določili vrednosti funkcije $f(x)$ za vmesne vrednosti neodvisne spremenljivke x , lahko uporabimo eno od metod interpolacije, ki temelji

na določitvi predpostavke o vrsti neznane funkcije, kot so eksponentna funkcija, polinom ... (Interpolacija in aproksimacija ..., 2021).

Računsko najpreprostejša in dobro znana metoda je linearna interpolacija, pri kateri predpostavljamo, da je funkcija $f(x)$ linearna (Pownuk in Kreinovich, 2017). V grafični obliki je linearna funkcija premica, ki jo določata dve točki (x_1, y_1) in (x_2, y_2) . Definiramo jo lahko tudi kot polinom prve stopnje ($n = 1$). Za poljubno vrednost neodvisne spremenljivke x na intervalu $[x_1, x_2]$ je vrednost odvisne spremenljivke y izračunana iz enačbe za smerni koeficient premice (Linear interpolation, 2021):

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (9)$$

k – smerni koeficient premice, ki poteka skozi dani točki (x_1, y_1) in (x_2, y_2)

x – vmesna vrednost na intervalu $[x_1, x_2]$; $x_1 < x < x_2$

y – vrednost funkcije $f(x)$

Če iz enačbe (9) izpeljemo y , dobimo (Pownuk in Kreinovich, 2017):

$$y = \frac{(y_2 - y_1) \cdot (x - x_1)}{(x_2 - x_1)} + y_1 = \frac{y_1(x_2 - x) + y_2(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (10)$$

Zgornja enačba je znana kot linearna interpolacija, ki jo zaradi enostavnega načina izračuna pogosto uporabljamo. Kljub temu ni primerna za vse naloge, saj so odnosi med spremenljivkami različni (koristimo jo predvsem za linearna razmerja).

2.8 Koordinatni sistemi

V geodeziji moramo za predstavitev merjenega položaja v prostoru najprej vzpostaviti ustrezen koordinatni sistem (Xu, 2007). Poznamo različne globalne in lokalne koordinatne sisteme (Seeger, 1999).

2.8.1 Pravokotni koordinatni sistem (X, Y, Z)

Koordinatni sistem ECEF (angl. Earth Centered Earth Fixed) je globalni pravokotni koordinatni sistem, ki je pritrjen na zemeljsko skorjo. Način pritrditve je določen z dogovorom o sodobnih terestričnih koordinatnih sistemih, ki so realizirani z geodetskimi observatoriji (geodetske točke). Koordinatni sistem ECEF je zato znan tudi kot dogovorjeni terestrični koordinatni sistem CTS (angl. Conventional Terrestrial Reference System). Njegovo izhodišče je v težišču Zemlje (geocenter). Pozitivna smer osi X

je usmerjena proti presečišču ekvatorja (srednja ekvatorska ravnina) in začetnega meridiana (srednji meridian Greenwicha). Pozitivna os Z sovpada s srednjo rotacijsko osjo Zemlje, ki je mednarodno dogovorjeno izhodišče CIO (angl. Conventional International Origin) v smeri srednjega zemeljskega pola. Terciarna os Y dopolnjuje medsebojno pravokotne osi in s pozitivno smerjo tvori desnosučni koordinatni sistem (Xu, 2007; Stopar, 2017c).

2.8.2 Elipsoidni (geodetski) koordinatni sistem (φ, λ, h)

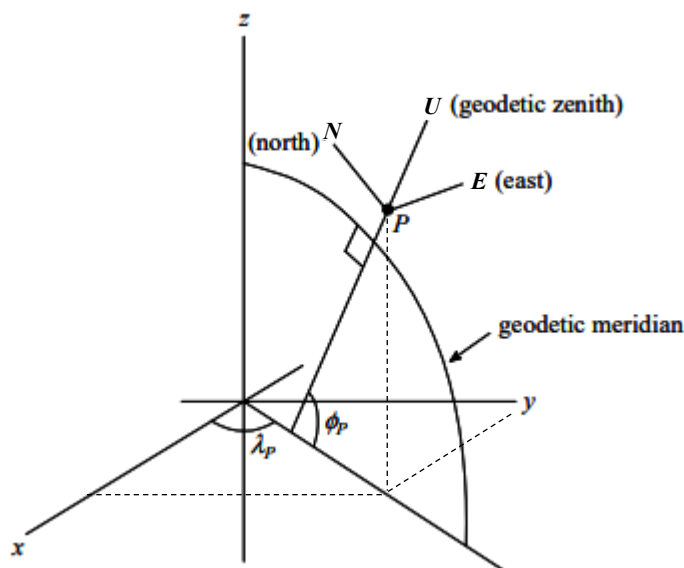
Na osnovi koordinat ECEF se lahko določi elipsoidni koordinatni sistem (φ, λ, h), ki je vezan na referenčni elipsoid (npr. WGS-84, GRS-80, PZ-90 ...). Oblika in velikost elipsoida je določena z dvema parametroma, praviloma sta to velika polos a in eden izmed ostalih parametrov (mala polos b , prva sploščenost f ...). Elipsoidna širina φ , elipsoidna dolžina λ in elipsoidna višina h so definirane na podlagi predpostavke, da središče globalnega elipsoida sovpada s težiščem Zemlje, mala polos b pa z njeno rotacijsko osjo. Elipsoidne (tudi geodetske) koordinate so vezane na normalo, ki je v točki elipsoida pravokotna nanj. Kot med normalo na elipsoid v točki P in ravnino ekvatorja imenujemo elipsoidna širina (φ). Elipsoidna dolžina λ je kot med ravnino začetnega meridiana (Greenwich) in meridiansko ravnino točke P . Elipsoidna višina h predstavlja oddaljenost točke P na površju Zemlje od njene projekcije na elipsoid (p) vzdolž normale (Seeger, 1999; Xu, 2007).

2.8.3 Lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U)

Krajevni oziroma lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U) je trirazsežni pravokotni koordinatni sistem z izhodiščem v poljubni lokalni referenčni točki P (φ, λ, h), ki se nanaša na dani elipsoid. Kadar izhodiščna točka leži na zemeljskem površju, ga imenujemo tudi topocentričen koordinatni sistem. Os U (angl. Up) sovpada z normalo na elipsoid skozi točko P in je s pozitivnim predznakom usmerjena navzgor. V smeri naraščanja elipsoidne dolžine λ je os E (angl. East) pozitivna in pravokotna na meridiansko ravnino točke P . Kadar je $h = 0$, os E predstavlja tangento na vzporednik točke P . Pozitivna smer osi N (angl. North) tvori desnosučni koordinatni sistem in v primeru $h = 0$ sovpada s tangento na meridian točke P (Soler in Hothem, 1988).

Lokalni koordinatni sistem (E, N, U) je zelo podoben geocentričnemu pravokotnemu koordinatnemu sistemu (X, Y, Z). Za prehod med njima je potrebna translacija izhodišča od središča Zemlje do lokalne točke in nato zasuki osi. Orientacija lokalnega koordinatnega sistema se spreminja s položajem lokalne referenčne točke P , v kateri je vzpostavljena tangencialna ravnina glede na referenčni elipsoid. Čeprav se položaji merjenih točk preslikajo na omenjeno ravnino, ne gre za kartografsko projekcijo. Razlike med lokalnimi in elipsoidnimi koordinatami se z naraščanjem oddaljenosti od lokalnega izhodišča

večajo. Lokalni koordinatni sistem zato vzpostavimo za manjša območja izmere (do nekaj km), pri katerih omenjene razlike niso značilne (Meyer, 2002; Jekeli, 2016).



Slika 7: Pravokotni koordinatni sistem (X, Y, Z) in lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U) glede na elipsoidno širino φ in elipsoidno dolžino λ točke P (Jekeli, 2016)

2.9 Prehod iz globalnega (G) v lokalni (LG) geodetski koordinatni sistem

Zaradi lažje in bolj praktične predstavitve merjenih položajev ter izvedbe nadaljnjih analiz se pogosto odločimo, da globalne koordinate pretvorimo in/ali transformiramo v lokalne, ki niso odvisne od projekcije. Postopek prehoda iz globalnih elipsoidnih koordinat (φ, λ, h) v lokalne geodetske koordinate (E, N, U) je sestavljen iz (Soler in Hothem, 1988):

1. pretvorbe $(\varphi, \lambda, h) \rightarrow (X, Y, Z)$ in
2. transformacije $(X, Y, Z) \rightarrow (E, N, U)$.

2.9.1 Pretvorba iz sistema (φ, λ, h) v sistem (X, Y, Z)

Pri pretvorbi iz elipsoidnih koordinat (φ, λ, h) v pravokotne koordinate (X, Y, Z) predpostavljamo, da se izhodišči obeh koordinatnih sistemov med seboj ujemata in da so osi kartezičnega koordinatnega sistema medsebojno pravokotne vzdolž male polosi b ter v ekvatorski ravnini elipsoida. Glede na dane koordinate (φ, λ, h) in parametre referenčnega elipsoida (a, f) so pravokotne koordinate (X, Y, Z) izračunane kot (Jekeli, 2016):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ (N(1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (11)$$

N – polmer ukrivljenosti prvega vertikalna na elipsoidni širini φ [m]

e – prva ekscentriciteta referenčnega elipsoida [/]

Polmer ukrivljenosti prvega vertikalna N je dolžina normale od točke na referenčnem elipsoidu do male polosi b (Jekeli, 2016):

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (12)$$

a – velika polos rotacijskega elipsoida [m]

Prva ekscentriciteta e je definirana kot:

$$e = \sqrt{2f - f^2} \quad (13)$$

f – prva sploščenost referenčnega elipsoida [/]

2.9.2 Transformacija iz sistema (X, Y, Z) v sistem (E, N, U)

Transformacija iz pravokotnih koordinat (X, Y, Z) v lokalne geodetske koordinate (E, N, U) temelji na uporabi rotacijskih matrik za zasuke okoli osi X in Z za kot zasuka θ (Sanz Subirana, Juan Zornoza, Hernández-Pajares, 2011):

$$R_1[\theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_3[\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

R_1 – rotacijska matrika za zasuk koordinatnega sistema okoli X -osi za kot θ

R_3 – rotacijska matrika za zasuk koordinatnega sistema okoli Z -osi za kot θ

Najprej izvedemo zasuk okoli X -osi za kot $(90^\circ - \varphi)$, pri čemer os Z poravnamo z osjo U . Nato sledi zasuk okoli Z -osi za kot $(90^\circ + \lambda)$, da os X uskladimo z osjo E . Vrednosti φ in λ pripadata lokalni referenčni točki P . S produktom obeh matrik dobimo skupno rotacijsko matriko oziroma

transformacijsko matriko R (Soler in Hothem, 1988; Sanz Subirana, Juan Zornoza, Hernández-Pajares, 2011):

$$R = R_1 \left[\frac{\pi}{2} - \varphi \right] R_3 \left[\frac{\pi}{2} + \lambda \right] = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda \sin \varphi & -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \lambda \cos \varphi & \sin \lambda \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (16)$$

φ – elipsoidna širina lokalne referenčne točke P [rad]

λ – elipsoidna dolžina lokalne referenčne točke P [rad]

Enačba transformacije za preračun koordinat poljubne točke T iz sistema (X, Y, Z) v sistem (E, N, U) v matrični obliki (Jekeli, 2016):

$$\begin{bmatrix} E_{PT} \\ N_{PT} \\ U_{PT} \end{bmatrix}^{LG} = R \begin{bmatrix} \Delta X_{PT} \\ \Delta Y_{PT} \\ \Delta Z_{PT} \end{bmatrix}^G, \quad (17)$$

pri čemer so $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ komponente vektorja $\overrightarrow{PT}$ v globalnem pravokotnem koordinatnem sistemu (X, Y, Z) :

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{PT} \\ \Delta Y_{PT} \\ \Delta Z_{PT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T - X_P \\ Y_T - Y_P \\ Z_T - Z_P \end{bmatrix} \quad (18)$$

$P(X_P, Y_P, Z_P)$ – pravokotne koordinate lokalne referenčne točke P v sistemu (X, Y, Z)

$T(X_T, Y_T, Z_T)$ – pravokotne koordinate poljubne točke T v sistemu (X, Y, Z)

Koordinate točke P so v lokalnem sistemu (E, N, U) enake:

$$\begin{bmatrix} E_P \\ N_P \\ U_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ m}, \quad (19)$$

zato so koordinate poljubne točke T v sistemu (E, N, U) določene kot:

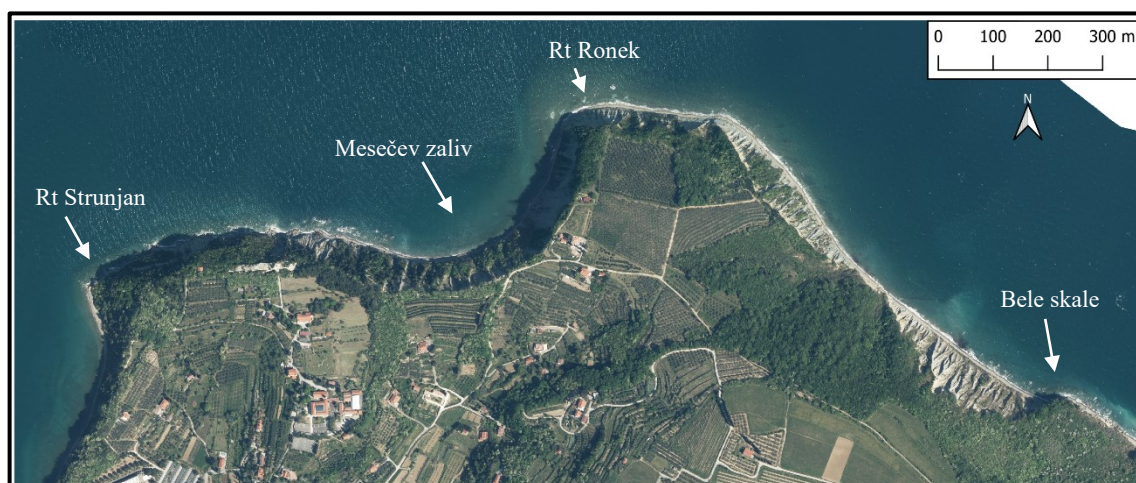
$$\begin{bmatrix} E_T \\ N_T \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda \sin \varphi & -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \lambda \cos \varphi & \sin \lambda \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T - X_P \\ Y_T - Y_P \\ Z_T - Z_P \end{bmatrix} \quad (20)$$

3 OPIS DELOVIŠČA IN OBDELAVA OPAZOVANJ

3.1 Testno območje

Letalnik P4RTK smo preizkusili na območju Strunjanskega klifa, ki je del slovenske obale Jadranskega morja. Strme stene klifa, visoke do 80 m, so zgrajene iz mehkih flišnih plasti peščenjaka, laporja in karbonatnega turbidita. Morski valovi in vremenske razmere (veter, dež ...) nenehno oblikujejo podobo obale ter vplivajo na nastanek zanimivih geoloških pojavov, kot so prelomi in gube, spodmoli, nalomljeni skalni bloki ipd. (Ilich, 2006). Spreminjanje obalnega pasu lahko spremljamo in preučujemo tudi z geodetskimi merskimi metodami, kot je na primer fotogrametrični zajem z letalnikom. Pristop smo preizkusili tudi v naši raziskovalni nalogi, kjer nas je zanimala kakovost določitve položaja uporabljenega letalnika z metodami izmere RTK in PPK. Območje je namreč zaradi svojih reliefnih značilnosti (visoke stene in druge naravne ali umetne ovire) problematično z vidika sprejema satelitskega signala GNSS in pokritosti območja s signalom mobilnega omrežja (Wingtra, 2020). Oba vpliva sta prisotna pri izmeri z metodo RTK, medtem ko je pri metodi PPK lahko moten le sprejem signala GNSS, saj vzpostavitev telemetrične povezave med referenčnim in mobilnim sprejemnikom ni potrebna. V oteženih terenskih pogojih smo preizkusili različne lokacije postavitve baznih postaj za navezavo snemalnih misij, opravljenih na več delih obalnega pasu.

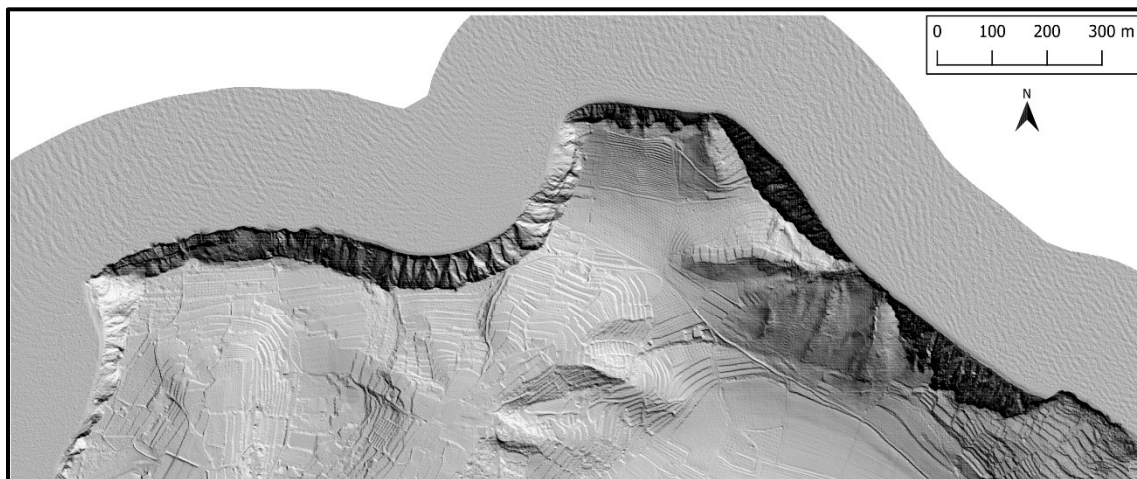
Za testno območje smo izbrali severno obalo Strunjanskega polotoka od rta Strunjan preko Mesečevega zaliva in rta Ronek do odseka skalnih gmot, imenovanega Bele skale (slika 8).



Slika 8: Testno območje (podlaga: DOF050, k. s. D96/TM, stanje 2020)

Prepadne stene klifa predstavljamo tudi z digitalnim modelom reliefa (DMR) na sliki 9. Z analitičnim senčenjem modela (azimut osvetlitve 225°) smo želeli poudariti zaprtost območja obalnega pasu proti jugu in jugozahodu, kar za izmero GNSS ni ugodno. Različne postavitve baznih postaj (glej poglavji

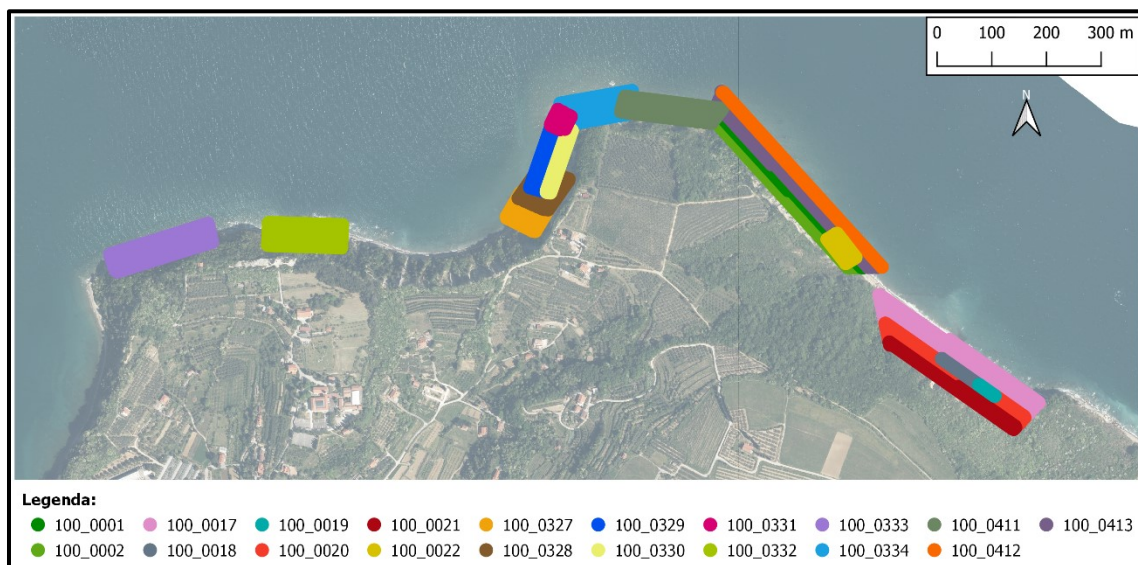
3.1.2 in 3.1.3), ločenih za RTK in PPK, so omogočale večkratno določitev položaja iste snemalne misije in primerjavo rezultatov, na podlagi katerih smo oblikovali priporočila za optimalno postavitev baze letalnika v podobnih terenskih razmerah.



Slika 9: Testno območje – digitalni model reliefa (prostorska ločljivost: 0,5 m, azimut in višinski kot osvetlitve: 225° in 45°)

3.1.1 Snemalne misije letalnika P4RTK

Fotogrametrično snemanje testnega območja je potekalo v dnevih 9. 11. 2020 in 5. 3. 2021, ko je letalnik P4RTK opravil skupno 21 snemalnih misij. V vsaki od njih je zajel določeno število posnetkov glede na načrtovan vzorec letenja. Položaji projekcijskih centrov posnetkov so bili določeni z dvema načinoma direktnega georeferenciranja, tj. v realnem času z metodo RTK in naknadno z metodo PPK. Pri obeh izmerah smo uporabili lastne bazne postaje v bližini snemanja.



Slika 10: Lokacije snemalnih misij letalnika P4RTK na dan 9. 11. 2020

V prvem terminu (9. 11. 2020) se je vsaka snemalna misija (slika 10) navezovala na eno bazno stojišče za RTK in eno za PPK. Da bi raziskali vpliv lokacije baze na kakovost rešitev RTK in PPK smo v letu 2021 (slika 11) ponovili izmero za dve snemalni misiji 100_0327 (100_0031) in 100_0328 (100_0032), pri čemer smo se v primeru metode PPK navezali na več baznih stojišč.



Slika 11: Lokaciji snemalnih misij letalnika P4RTK na dan 5. 3. 2021

Letalnik se je v času izmere premikal s konstantno hitrostjo 2 m/s, ki je bila enaka za vse snemalne misije. Ob vsakem zajetem posnetku se je v realnem času zabeležil položaj njegovega projekcijskega centra, določen z metodo RTK (glej poglavje 2.5.2). Hkrati je bil aktiviran tudi modul PPK, ki je poskrbel za shranjevanje surovih opazovanj GNSS z intervalom registracije 0,2 s. Pri omenjeni hitrosti letalnika je to pomenilo določitev njegovega položaja na vsakih 40 cm premika (teoretično). Ker so bili posnetki zajeti ob poljubnih časovnih trenutkih, smo morali za ustrezno primerjavo z rešitvami RTK položaje PPK prilagoditi (glej poglavje 3.3).

3.1.2 Bazne postaje za RTK

Za določitev položaja letalnika z metodo RTK smo vzpostavili tri lokalne bazne postaje ST2, ST3 in ST4, saj navezava na državno omrežje SIGNAL ni bila mogoča zaradi slabe pokritosti testnega območja s signalom mobilnega omrežja. Položaje baznih točk smo določili predhodno s statično metodo izmere GNSS. Njihove elipsoidne koordinate so zapisane v preglednici 2.

Preglednica 2: Elipsoidne koordinate baznih točk za navezavo letalnika v načinu RTK

Bazna postaja za RTK	φ	λ	h
ST2	45° 32' 23,19055" N	13° 36' 46,78278" E	44,8737 m
ST3	45° 32' 20,55863" N	13° 37' 05,29083" E	45,5619 m
ST4	45° 32' 16,22725" N	13° 37' 09,70012" E	45,1706 m

Vse baze za RTK smo namestili ob vznožju klifa (spodaj), pri čemer je isto stojišče služilo za navezavo več snemalnih misij v obeh terminih izmere (slika 12; preglednica 3).



Slika 12: Bazne postaje za določitev položaja letalnika P4RTK z metodo RTK (ST2, ST3, ST4)

Preglednica 3: Snemalne misije z navezavo na bazne postaje za RTK

	Snemalna misija	Bazne postaje za RTK	Datum izmere
1	100_0327	ST2 (spodaj)	9. 11. 2020
2	100_0328		
3	100_0329		
4	100_0330		
5	100_0331		
6	100_0332		
7	100_0333		
8	100_0334		
9	100_0001	ST3 (spodaj)	
10	100_0002		
11	100_0411		
12	100_0412		
13	100_0413		
14	100_0017	ST4 (spodaj)	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 3

15	100_0018	ST4 (spodaj)	9. 11. 2020
16	100_0019		
17	100_0020		
18	100_0021		
19	100_0022		
20	100_0031	ST2 (spodaj)	5. 3. 2021
21	100_0032		

V vlogi referenčnega sprejemnika smo uporabili instrument D-RTK 2 Mobile Station, ki je kompatibilen z letalnikom P4RTK (preglednica 4).

Preglednica 4: Lastnosti GNSS-tehnologije v sprejemniku D-RTK 2 Mobile Station

	Sprejem signalov GNSS	Točnost meritev
D-RTK 2 Mobile Station	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou	Hz: 1 cm + 1 ppm (RTK) V: 2 cm + 1 ppm (RTK) (DJI, 2021d)

3.1.3 Bazne postaje za PPK

Pri vsaki snemalni misiji iz prvega termina izmere smo se navezali le na eno bazno postajo za določitev položaja letalnika z metodo PPK. Točke A, B, C, D, F in H smo postavili v bližino baz za RTK (ST2 in ST3), medtem ko smo točki I in J za razliko od ostalih namestili na vrh klifa (slika 13; preglednica 6). V letu 2021 smo za namen raziskave vzpostavili tri bazne postaje ST1, K in L, ki so opazovanja GNSS sprejemala istočasno. Točki ST1 in L sta se nahajali nad klifom (zgoraj), točko K pa smo locirali ob obali (poleg ST2). Vse baze za PPK smo vzpostavili na točkah z neznanimi koordinatami, zato so bili njihovi položaji določeni naknadno z navezavo na stalno postajo KOPE v Kopru, ki je del državnega omrežja SIGNAL. Elipsoidne koordinate baznih postaj za PPK so zbrane v preglednici 5.

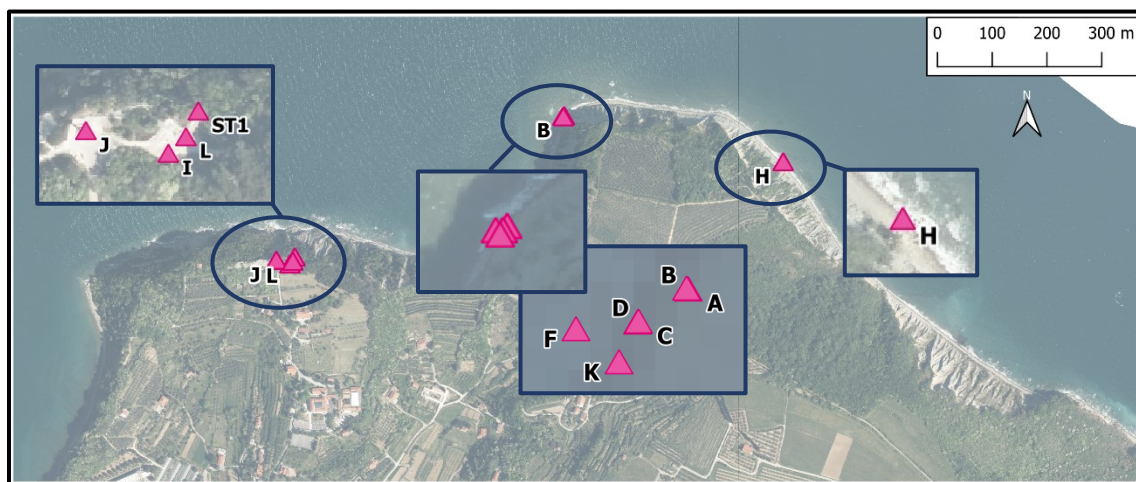
Preglednica 5: Elipsoidne koordinate baznih točk za navezavo letalnika v načinu PPK

Bazna postaja za PPK	φ	λ	h
A	45° 32' 23,02796" N	13° 36' 46,76290" E	45,1421 m
B	45° 32' 23,02864" N	13° 36' 46,76084" E	45,1345 m
C	45° 32' 23,00317" N	13° 36' 46,71045" E	45,1078 m
D	45° 32' 23,00403" N	13° 36' 46,71081" E	45,1231 m
F	45° 32' 22,99741" N	13° 36' 46,64531" E	45,0013 m
H	45° 32' 20,53788" N	13° 37' 05,26077" E	45,6218 m

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 5

I	45° 32' 13,99509" N	13° 36' 23,89257" E	102,4554 m
J	45° 32' 14,20429" N	13° 36' 22,74053" E	104,2961 m
K	45° 32' 22,97368" N	13° 36' 46,69110" E	46,5675 m
L	45° 32' 14,16181" N	13° 36' 24,13043" E	102,4663 m
ST1	45° 32' 14,41485" N	13° 36' 24,29404" E	99,7507 m



Slika 13: Bazne postaje za določitev položaja letalnika P4RTK z metodo PPK (ST1, A, B, C, D, F, H, I, J, K, L)

Preglednica 6: Snemalne misije z navezavo na bazne postaje za PPK

	Snemalna misija	Bazne postaje za PPK	Datum izmere
1	100_0327	A (spodaj)	9. 11. 2020
2	100_0328		
3	100_0329	B (spodaj)	
4	100_0330	C (spodaj)	
5	100_0331		
6	100_0332		
7	100_0333	D (spodaj)	
8	100_0334	F (spodaj)	
9	100_0001	H (spodaj)	
10	100_0002		
11	100_0411		
12	100_0412		
13	100_0413		
14	100_0017	I (zgoraj), J (zgoraj)	
15	100_0018	J (zgoraj)	
16	100_0019		

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 6

17	100_0020	J (zgoraj)	9. 11. 2020
18	100_0021		
19	100_0022		
20	100_0031	ST1 (zgoraj), K (spodaj),	5. 3. 2021
21	100_0032	L (zgoraj)	

Na bazne točke za PPK smo namestili komercialne GNSS-sprejemnike proizvajalca Leica. Za točke A, B, C, D, F, H, I in J smo uporabili instrument Leica GS15, za točke ST1, K in L pa Leica GS18 T (preglednica 7). Interval registracije signala GNSS je znašal 0,2 s.

Preglednica 7: Lastnosti GNSS-tehnologije v sprejemnikih Leica GS15 in Leica GS18 T

	Sprejem signalov GNSS	Točnost meritev
Leica GS15	GPS, GLONASS, Galileo	Hz 3 mm + 0,1 ppm (statično) V 3,5 mm + 0,4 ppm (statično) (Leica Geosystems, 2012)
Leica GS18 T	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC, SBAS, L-Band	Hz: 3 mm + 0,1 ppm (statično) V: 3,5 mm + 0,4 ppm (statično) (Leica Geosystems, 2017)

3.2 Določitev položaja letalnika z metodo RTK

Pri določitvi položaja letalnika z metodo RTK je vlogo bazne postaje prevzela lastna referenčna postaja D-RTK 2 Mobile Station, ki smo jo za izvedbo posamezne snemalne misije vedno postavili na eno od danih točk ob vznožju klifa (ST2, ST3, ST4; glej poglavje 3.1.2). Omenjena postaja je preko posebnega sistema OcuSync pošiljala podatke letalniku za popravo njegovega položaja v realnem času. Internetna povezava v tem primeru ni bila potrebna. Na osnovi časovne sinhronizacije meritev in avtomatske poprave položaja za vrednosti zamikov APC-CMOS v trenutku ekspozicije (glej poglavji 2.5.1 in 2.5.2) so se končne elipsoidne koordinate projekcijskih centrov posnetkov zapisale v datoteko Timestamp.MRK (slika 14). Dobljene položaje smo neposredno uporabili za nadaljnjo analizo.

1	462604.311564	[2147]	34,N	66,E	179,V	45.53848382,Lat 13.61198699,Lon 62.605,El1h
2	462606.783943	[2147]	-13,N	42,E	189,V	45.53844359,Lat 13.61195357,Lon 62.405,El1h
3	462609.277169	[2147]	-10,N	40,E	190,V	45.53840580,Lat 13.61192333,Lon 62.422,El1h
4	462611.814278	[2147]	-7,N	40,E	190,V	45.53836648,Lat 13.61189094,Lon 62.435,El1h
5	462614.288701	[2147]	-12,N	38,E	190,V	45.53832697,Lat 13.61185917,Lon 62.485,El1h
6	462616.796395	[2147]	-9,N	38,E	191,V	45.53828796,Lat 13.61182726,Lon 62.478,El1h
7	462619.301923	[2147]	-11,N	30,E	192,V	45.53824851,Lat 13.61179452,Lon 62.457,El1h
8	462621.803459	[2147]	-11,N	35,E	191,V	45.53820905,Lat 13.61176363,Lon 62.444,El1h
9	462624.305040	[2147]	-13,N	33,E	192,V	45.53817007,Lat 13.61173201,Lon 62.395,El1h
10	462626.802537	[2147]	-5,N	36,E	191,V	45.53813184,Lat 13.61170130,Lon 62.340,El1h

Slika 14: Izsek iz datoteke Timestamp.MRK za snemalno misijo 100_0031. V stolpcih 7–9 so zapisane elipsoidne koordinate projekcijskih centrov posnetkov, določene z metodo RTK.

3.3 Določitev položaja letalnika z metodo PPK

Letalnik P4RTK je tekom vsake snemalne misije shranjeval tudi surova opazovanja GNSS za naknadno določitev njegovega položaja po metodi PPK. Registracija meritev z intervalom 0,2 s je istočasno in neodvisno potekala na eni ali več baznih postaj z neznanimi koordinatami, kjer smo namestili sprejemnike Leica GS15 in GS18 T (odvisno od izmere; glej poglavje 3.1.3). Ti so sprejemali signale treh satelitskih sistemov (GPS, GLONASS in Galileo). Za posamezno snemalno misijo smo po koncu izmere pridobili dve datoteki RINEX z opazovanji GNSS, in sicer eno z letalnika (Rinex.obs) ter drugo z baznega stojišča (*.YYo). Z njuno naknadno obdelavo smo prišli do delnih rešitev, ki smo jih morali za primerjavo z rešitvami RTK dodatno korigirati, kot bo opisano v naslednjih podpoglavjih.

3.3.1 Obdelava opazovanj GNSS

Opazovanja GNSS z baznih postaj za PPK in z letalnika smo obdelali v programu Leica Infinity. V prvem terminu izmere so bili položaji letalnika v okviru posamezne snemalne misije določeni glede na eno od baznih postaj (izjema misija 100_0017, ki se je navezovala na dve točki – I in J). V drugem terminu smo preizkušali obnašanje rešitev v odvisnosti od lokacije baznega stojišča, zato smo obe misiji navezali na vse tri razpoložljive baze ST1, K in L. Pri obdelavi smo uporabili končne precizne efemeride (*.sp3), kalibracijske parametre anten službe NGS (angl. National Geodetic Survey) in izbrani model troposferske refrakcije *VMF with GPT2 model*. Za višinski kot sprejema signalov GNSS smo izbrali vrednost 10°. Rezultat naknadne obdelave je bila množica baznih vektorjev med izbrano bazno postajo in letalnikom za vsakih 0,2 s. Izračunani položaji so se nanašali na fazni center antene GNSS na letalniku.

Naknadno obdelavo opazovanj GNSS smo poskusno opravili v prosto dostopnem programu RTKLib in s komercialnim programom Trimble Business Center (TBC). Njuna prednost je enostaven postopek obdelave in dejstvo, da so rezultati primerljivi s tistimi iz Leica Infinity. Manjši pomanjkljivosti sta, da RTKLib pri časih opazovanj ne upošteva prestopnih sekund, v programu TBC pa so rešitve prikazane le z intervalom sekunde. To pomeni, da je za isti časovni trenutek izpisanih več rešitev, o katerih lahko sklepamo, da so v primeru registracije meritev z intervalom, krajšim od 1 s (npr. 0,2 s), podane v ustreznem časovnem zaporedju.

Opozoriti moramo, da datoteke Rinex.obs z letalnika P4RTK niso neposredno uporabne za naknadno obdelavo, saj vsebujejo nekatere anomalije, ki jih moramo predhodno obvezno odpraviti. V datotekah z opazovanji GNSS smo našli naslednje nepravilnosti, ki so označene na sliki 15:

- napake v besedah (v glavi datoteke je beseda »COMMENT« zapisana le z eno črko M),
- napačne epohe opazovanj (pri datumu prvega opazovanja se pojavi letnica 1980),

- manjkajoč presledek na koncu zapisanega datuma in ure registracije opazovanj (30. stolpec):
 - >2021·3·5·8·41·24.6000000·0·22 (**nepravilno**),
 - >2021·3·5·8·41·24.6000000·0·22 (**pravilno**).

The image shows a RINEX observation data file. The header section includes fields like 'OBSERVATION DATA', 'M: Mixed', 'RINEX VERSION / TYPE', 'RTKCONV 2.4.3 b29', 'log: I:/xxx/xxx/xxxx/xxx', 'format: RTCM 3, station ID: 0', and '0000'. The observation data section contains fields like 'MARKER NAME', 'MARKER NUMBER', 'MARKER TYPE', 'OBSERVER / AGENCY', 'REC # / TYPE / VERS', 'ANT # / TYPE', 'APPROX POSITION XYZ', 'ANTENNA: DELTA H/E/N', 'SYS / # / OBS TYPES', 'TIME OF FIRST OBS', 'TIME OF LAST OBS', 'SYS / PHASE SHIFT', 'GLONASS SLOT / FRQ #', and 'GLONASS COD/PHS/BIS'. Red boxes highlight specific errors: 'COMMENT' in the header, '1980' in the observation data, and '0 0' in the observation data.

Slika 15: Izsek iz datoteke Rinex.obs za snemalno misijo 100_0032 z označenimi napakami

3.3.2 Filtriranje rešitev PPK

Po naknadni določitvi položajev letalnika, izračunanih za vsak trenutek registracije opazovanj, smo slednje filtrirali glede na njihovo kakovost. Želeli smo obdržati le tiste rešitve, ki so bile določene na osnovi opazovanj z vseh treh satelitskih sistemov (GPS, GLONASS in Galileo) in pri katerih so bile fazne nedoločenosti opredeljene kot naravna števila (rešitve »Phase Fixed«).

3.3.3 Pretvorba trenutkov ekspozicij iz GPS v UTC

Položaje letalnika, določene z metodo PPK, smo interpolirali na poljubne časovne trenutke nastanka posnetkov (glej poglavje 3.3.4). Ker so slednji podani v časovnem sistemu GPS, časi PPK-položajev letalnika pa v časovnem sistemu UTC, smo morali pred interpolacijo poskrbeti za usklajenost časovnih zapisov. Časovne trenutke ekspozicij iz datoteke Timestamp.MRK smo po opisanem postopku v poglavju 2.6 pretvorili v lokalni čas UTC+01:00, pri čemer smo upoštevali razliko prestopnih sekund (trenutno 18 s) ter časovni pas (+01:00) in letni čas (zimski čas → brez dodatnega zamika). Primer izpisanega časa predstavljamo v preglednici 8.

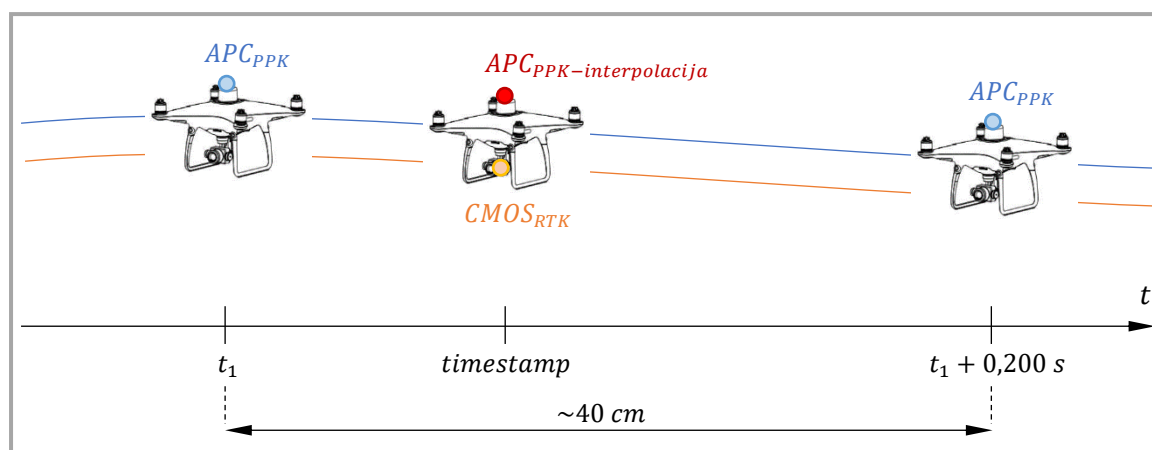
Preglednica 8: Isti časovni trenutek, izpisan v različnih časovnih sistemih

Časovni sistem	GPS	UTC	UTC _{Local} (+01:00)
<i>t</i> [hh:mm:ss]	08:41:35	08:41:17	09:41:17

3.3.4 Interpolacija rešitev PPK

Filtrirane elipsoidne koordinate letalnika, pridobljene z naknadno obdelavo podatkov, smo uporabili za izračun položajev letalnika v času ekspozicij (zajema posnetkov). Interpolirani vmesni položaji so bili določeni z linearno interpolacijo (glej poglavje 2.7) dveh sosednjih vrednosti po posameznih koordinatnih komponentah φ , λ in h . Velikost intervala, na katerem smo interpolirali, ni bila večja od intervala registracije opazovanj (0,2 s) oziroma od dolžine ~ 40 cm (slika 16). V primeru večjih vrzeli PPK-položaj posnetka ni bil določen, saj bi bile kasneje izračunane razlike v koordinatah RTK in PPK posledica slabe interpolacije namesto dejanskih razlik med metodama izmere.

Za uspešno interpolacijo je zelo pomembna tudi odločitev o izboru števila decimalnih mest sekunde za zapisane čase ekspozicij, ki jih letalnik P4RTK beleži s časovno ločljivostjo $1\ \mu\text{s}$. Interpolacija položajev na $1\ \mu\text{s}$ ni smiselna, saj je točnost ur v letalnikih (realna ocena ~ 1 ms) trenutno slabša od točnosti ur v navadnih sprejemnikih GNSS (~ 1 ns). Da bi lahko določili položaj letalnika s centimetrsko natančnostjo, bi morali pri hitrosti letenja $2\ \text{m/s}$ čas meriti z ločljivostjo najmanj 5 ms. V našem primeru smo se odločili za interpolacijo položajev na 1 ms, kar pomeni, da smo pridobili interpolirane PPK-položaje letalnika za vsakih 2 mm premika. Posamezen čas nastanka posnetka iz datoteke Timestamp.MRK smo zaokrožili na 1 ms in zanj poiskali enak časovni trenutek s pripadajočimi interpoliranimi koordinatami PPK. Slednje so predstavljale položaj faznega centra antene GNSS v trenutku zajema posnetka.

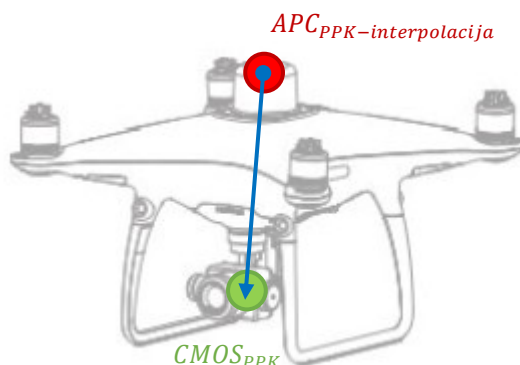


Slika 16: Interpolacija položaja letalnika za časovni trenutek nastanka posnetka (timestamp)

3.3.5 Upoštevanje zamikov APC–CMOS

Ker so bili interpolirani položaji posnetkov za razliko od rešitev RTK vezani na fazni center antene, smo jih popravili še za vrednosti zamikov do centra senzorja CMOS (slika 17). Slednje najdemo v datoteki

Timestamp.MRK (glej poglavje 2.5.5), kjer so zapisani ločeno po koordinatnih oseh N , E in D . Izračunajo se v realnem času glede na trenutno orientacijo letalnika v letu, ki jo meri sistem INS.

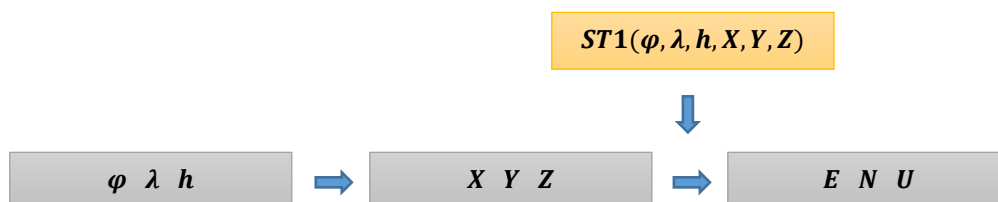


Slika 17: Poprava interpoliranega položaja letalnika za vrednost zamikov med faznim centrom antene (APC) in centrom senzorja CMOS

Z namenom primerjave obeh rešitev (RTK in PPK) in zaradi usklajenosti z dolžinsko mersko enoto zamikov smo interpolirane položaje posnetkov, vezane na APC, najprej pretvorili v koordinatni sistem ENU. Pri korekciji položajev smo bili pozorni na predznak višinskega zamika, ki je v smeri D vedno pozitiven, v smeri U pa negativen. Popravljeni položaje smo lahko uporabili za primerjavo z rešitvami RTK (oboje vezani na projekcijski center posnetkov).

3.4 Predstavitev položajev letalnika v koordinatnem sistemu (E , N , U)

Položaje letalnika smo obravnavali v lokalnem koordinatnem sistemu, ki je neodvisen od kartografske projekcije (glej poglavje 2.8.3). Za njegovo izhodišče smo izbrali točko ST1, glede na katero so se znotraj radija 1,5 km preslikali vsi končni položaji projekcijskih centrov posnetkov, določeni z metodama RTK in PPK. Njihove elipsoidne koordinate ($\varphi_{RTK}, \lambda_{RTK}, h_{RTK}, \varphi_{PPK}, \lambda_{PPK}, h_{PPK}$) smo najprej pretvorili v kartezični koordinatni sistem (X, Y, Z) in jih nadalje transformirali v lokalni geodetski koordinatni sistem (E, N, U). Za slednji prehod smo potrebovali tako elipsoidne kot tudi pravokotne koordinate lokalne referenčne točke ST1 (slika 18). Horizontalni komponenti E in N smo prikazali v ravnini EN (tangencialna ravnina), višinsko komponento U pa v obliki barvne lestvice (glej poglavje 4.1).



Slika 18: Prehod položajev (RTK in PPK) letalnika v lokalni koordinatni sistem preko točke ST1

3.5 Razlike v koordinatah RTK in PPK

Po podatkih proizvajalca letalnika P4RTK naj bi obe metodi izmere, RTK in PPK, zagotavljali enako, tj. centimetrsko točnost določitve položaja zajetih posnetkov. Ker nobene od rešitev nismo mogli privzeti za zanesljivo pravilno in položaji letalnika niso bili določeni z dodatno metodo izmere, ki bi dala natančnejše rezultate od rešitev RTK in PPK, ocena točnosti ni bila mogoča. Ustreznost uporabljene metode izmere v danih terenskih pogojih smo raziskali na podlagi izračunanih razlik v koordinatah posnetkov, pridobljenih glede na različne lokacije baznih postaj. Za lažjo analizo smo sosledja razlik prikazali tudi grafično po posameznih koordinatnih oseh E , N in U ter za absolutne vrednosti razlik izračunali osnovne statistike. Velikost in razpršenost razlik smo za vse snemalne misije hkrati predstavili z grafikoni kvartilov.

3.5.1 Osnovne statistike

Za absolutne vrednosti razlik v položajih posnetkov, določenih z metodo RTK in PPK, smo po posameznih komponentah ter za vsako snemalno misijo izračunali najmanjšo in največjo vrednost, mediano, aritmetično sredino in standardni odklon. Povprečne vrednosti razlik so zbrane v preglednici 9 (glej poglavje 4.2), kjer je zapisano tudi število ugodnih rešitev RTK in PPK glede na število zajetih posnetkov.

3.5.2 Grafikon kvartilov

Da bi prikazali razhajanja oziroma podobnosti med porazdelitvami koordinatnih razlik snemalnih misij, smo oblikovali grafikon kvartilov ali škatlo z brki (angl. boxplot). Prikaz temelji na izračunu medčetrtinskega ali (inter)kvartilnega razmika (angl. Interquartile Range, IQR), ki je smiseln, kadar podatki ne sledijo normalni porazdelitvi oziroma njihovih porazdelitev ne poznamo (Bartkowiak, 2015), kot to velja v našem primeru.

Posamezna škatla z brki je sestavljena iz pravokotnika (škatle), ki zajema 50 % vseh po velikosti urejenih koordinatnih razlik med 1. in 3. kvartilom. Večja kot je višina škatle, bolj so podatki razpršeni. Prvi kvartil predstavlja vrednost, od katere je 25 % koordinatnih razlik manjših in 75 % večjih. Obratna trditev velja za tretji kvartil. Vmesna črta označuje mediano podatkov (2. kvartil), brki pa kažejo na najmanjšo oziroma največjo vrednost prikazanih podatkov ob upoštevanju osamelcev. Slednji so določeni na osnovi medkvartilnega razmika ($Q3 - Q1$), ki ga pomnožimo s konstanto $k = 1,5$. Vrednosti, ki so manjše od $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ oziroma večje od $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ spadajo med osamelce (Bartkowiak, 2015). Na grafikonih (glej poglavje 4.2.2) smo označili tudi aritmetično sredino podatkov (znak plus).

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Položaji posnetkov snemalnih misij

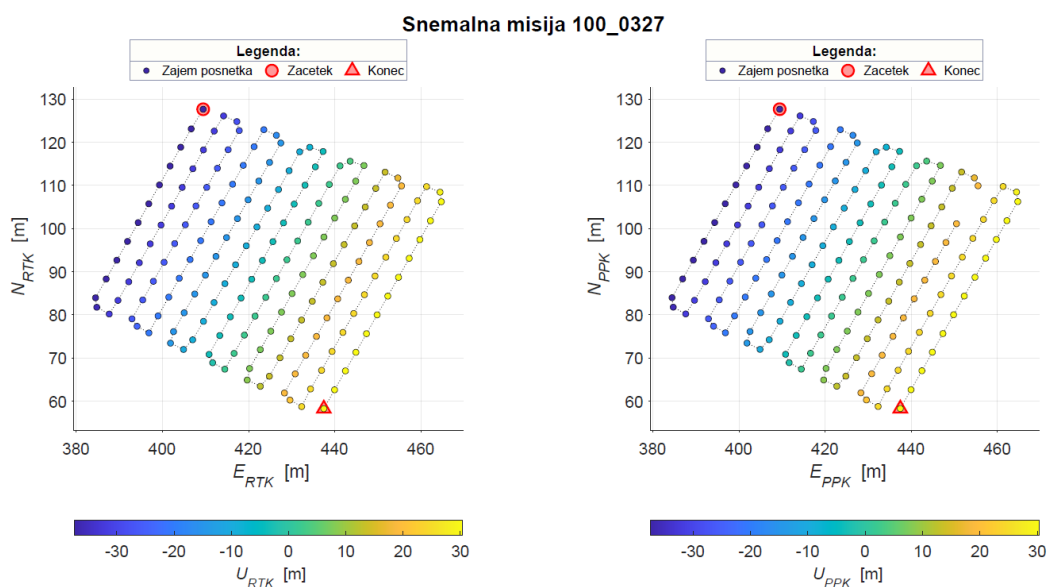
Po končanem postopku obdelave meritev, opisanem v poglavju 3, smo za vse opravljene snemalne misije iz obeh terminov izmere imeli na voljo lokalne geodetske koordinate projekcijskih centrov posnetkov, določene z metodama RTK in PPK. Na osnovi izrisanih položajev obeh rešitev, smo izpeljali nekaj začetnih ugotovitev.

Pri pregledu grafikonov smo opazili:

- manjkajoče rešitve PPK in
- grobe napake v rešitvah PPK.

Omenjeni nepravilnosti najdemo pri snemalnih misijah 100_0327, 100_0329, 100_0330, 100_0331, 100_0334, 100_0001, 100_0017, 100_0018, 100_0019, 100_0022, 100_0031 in 100_0032, katerih lokacije so prikazane na slikah 10 in 11. V ostalih misijah so vsi položaji posnetkov določeni z obema metodama izmere GNSS in brez vidnih anomalij, zato njihove položajne prikaze nismo posebej obravnavali.

Na vsaki od slik 19, 21, 24, 25, 26 in 27 lahko vidimo, da za nekatere posnetke PPK-položaji manjkajo, kar je posledica izločanja slabše kakovostnih rešitev v postopku filtriranja (glej poglavje 3.3.2) in nadalje onemogočene interpolacije omenjenih položajev (glej poglavje 3.3.4).



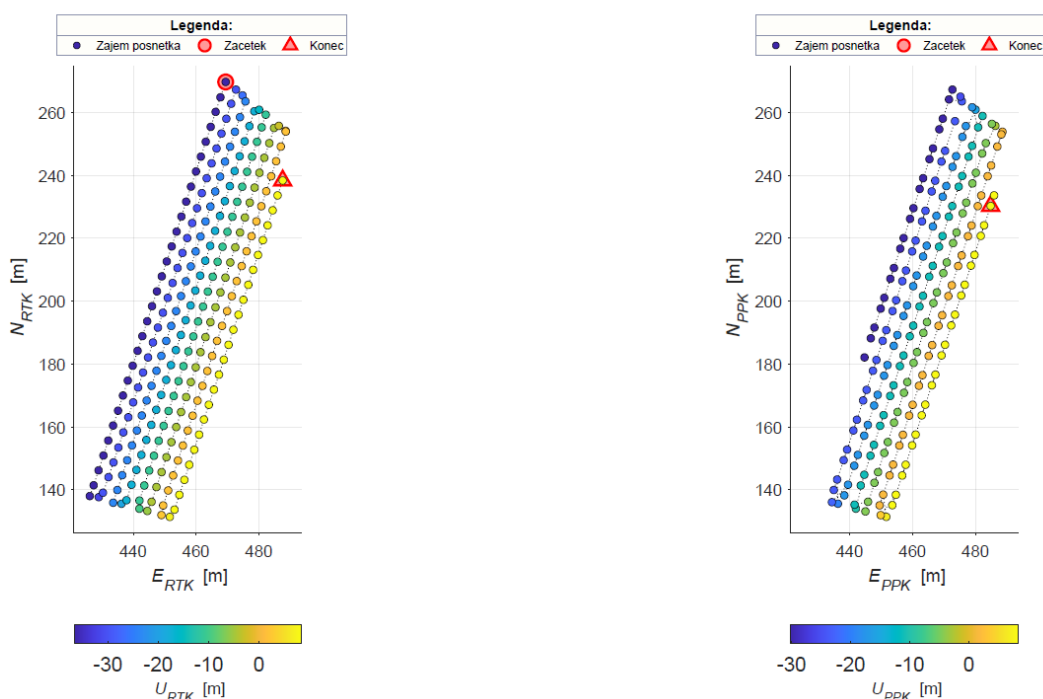
Slika 19: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0327), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.

Pri snemalni misiji 100_0329 na sliki 21 so poleg odsotnih rešitev PPK vidne tudi grobe napake, ki se kažejo v neobičajnem zaporedju PPK-položajev zajetih posnetkov. Slednje anomalije so prisotne tudi pri misijah 100_0330 in 100_0331 (sliki 22 in 23). Vzrok zanje so napačni časovni trenutki nastanka posnetkov, zabeleženi v datoteki Timestamp.MRK v realnem času izmere (slika 20). Domnevamo, da so ti posledica nepravilnega delovanja sistema za časovno sinhronizacijo meritev na letalniku, a pravega vzroka sicer ne poznamo.

1	118212.854967	[2131]	42,N	52,E	182,V	45.53986682,Lat
2	118211.047391	[2131]	-5,N	32,E	192,V	45.53982503,Lat
3	118217.844243	[2131]	-3,N	32,E	192,V	45.53978507,Lat
4	118216.055366	[2131]	-5,N	32,E	192,V	45.53974377,Lat
5	118222.848199	[2131]	-3,N	33,E	192,V	45.53970283,Lat
6	118221.055149	[2131]	-5,N	31,E	192,V	45.53966171,Lat
7	118227.847910	[2131]	-4,N	31,E	192,V	45.53962105,Lat
8	118226.044653	[2131]	-8,N	30,E	192,V	45.53960194,Lat
9	118232.841727	[2131]	-12,N	25,E	193,V	45.53959147,Lat
10	118231.046897	[2131]	-82,N	24,E	174,V	45.53958379,Lat
11	118237.835436	[2131]	-23,N	24,E	192,V	45.53962710,Lat
12	118236.025868	[2131]	-24,N	25,E	192,V	45.53966673,Lat
13	118242.828968	[2131]	-25,N	26,E	191,V	45.53970832,Lat
14	118241.031907	[2131]	-25,N	25,E	191,V	45.53974909,Lat
15	118247.820712	[2131]	-25,N	25,E	191,V	45.53978970,Lat

Slika 20: Izsek iz datoteke Timestamp.MRK za snemalno misijo 100_0331. Z rdečo barvo so označeni nepravilni časovni trenutki ekspozicij, katerih vrednosti izmenično padajo in naraščajo.

Snemalna misija 100_0329

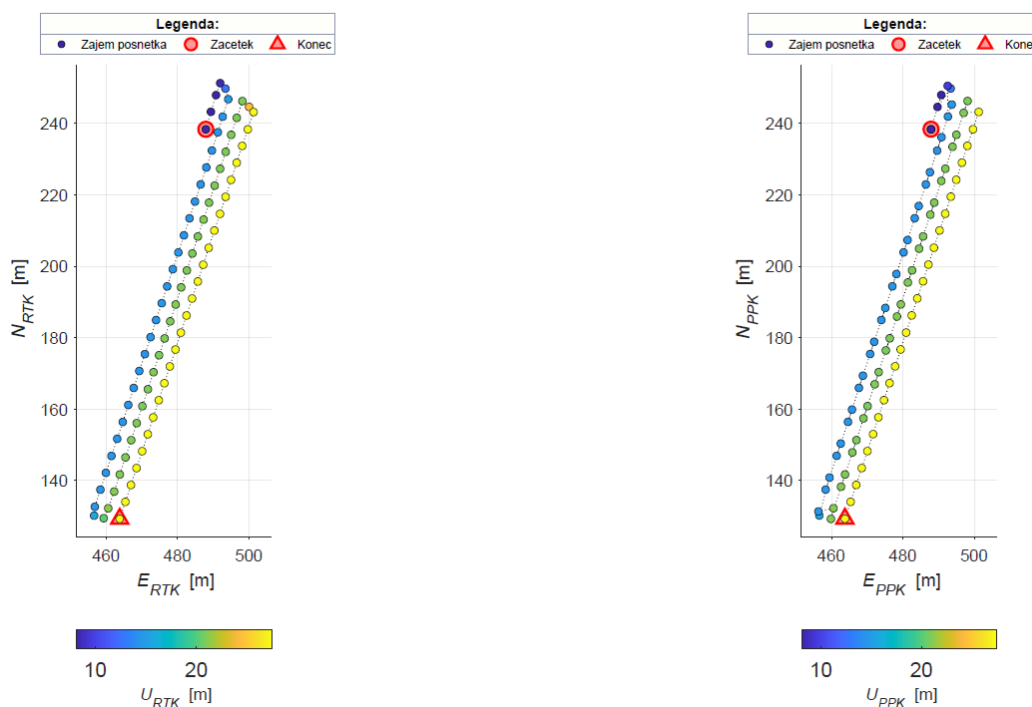


Slika 21: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0329), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo B.

Ker je glede na nepravilni čas ekspozicije izbrana tudi napačna dvojica filtriranih koordinat PPK za interpolacijo, so položaji posnetkov, določeni z metodo PPK, neuporabni za primerjavo z RTK. Vse tri

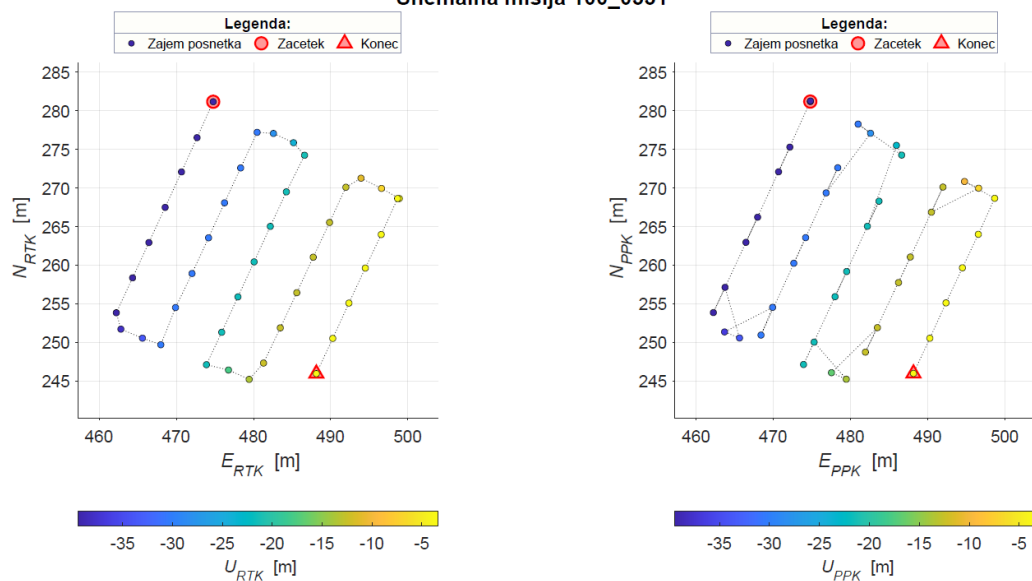
snemalne misije (100_0329, 100_0330, 100_0331) zato nismo vključili v nadaljnje grafične prikaze. Kljub temu moramo izpostaviti, da so rešitve RTK videti korektne in so po statusu določitve položaja (50 – FIXED) tudi primerne za kasnejšo uporabo v fotogrametričnih obdelavah.

Snemalna misija 100_0330



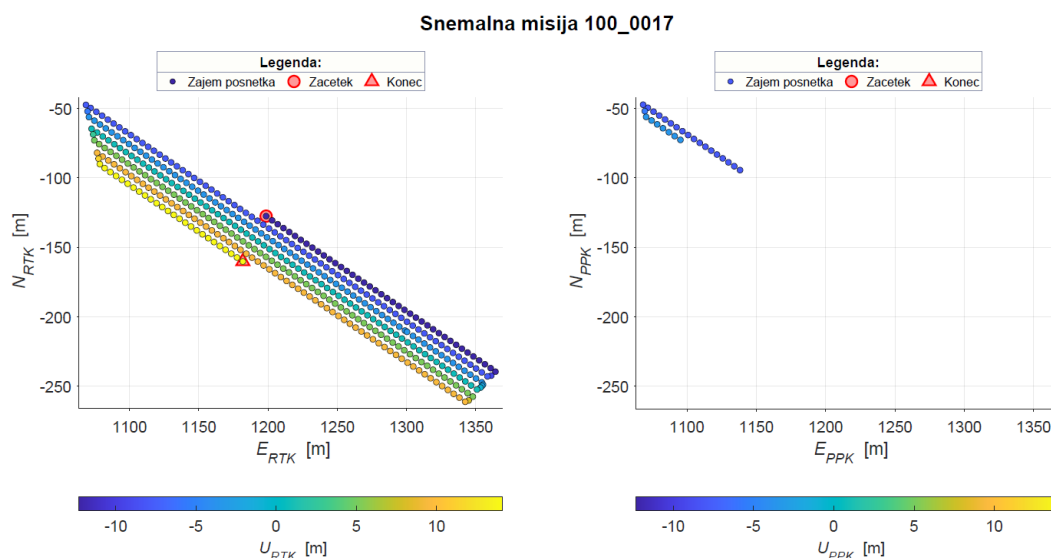
Slika 22: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0330), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.

Snemalna misija 100_0331

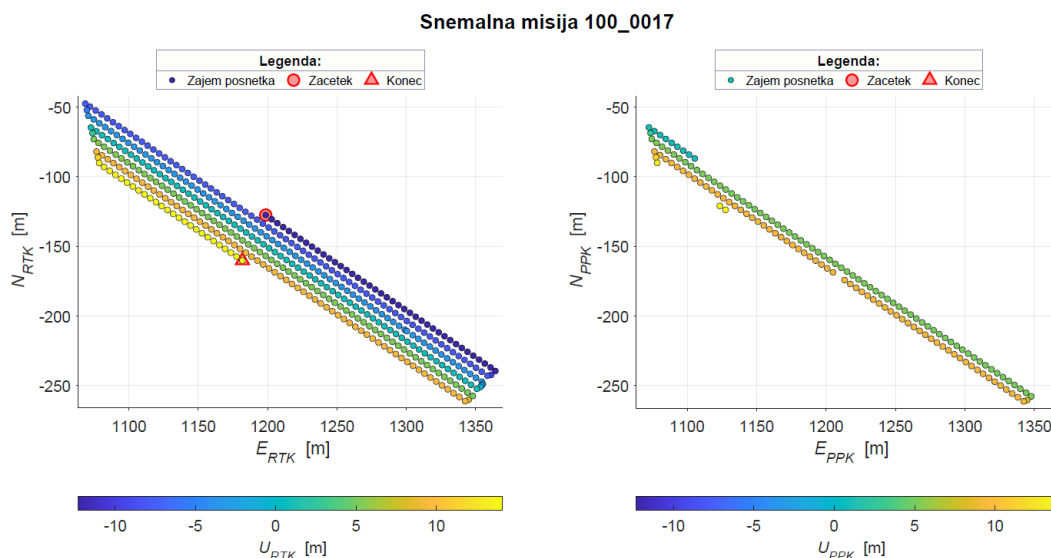


Slika 23: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0331), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.

Za posnetke, zajete na začetku in v sredini snemalne misije 100_0017, rešitev PPK nismo pridobili, saj sta bazni postaji I in J pokrivali samo del celotne misije. Od skupno 416 posnetkov je bilo z metodo PPK možno določiti položaje 197 posnetkov, od katerih je bilo nekaj slabše kakovosti (preglednica 9). Več kot polovica manjkajočih rešitev PPK na slikah 24 in 25 je torej posledica prekratkega časa trajanja opazovanj GNSS na bazah I in J.



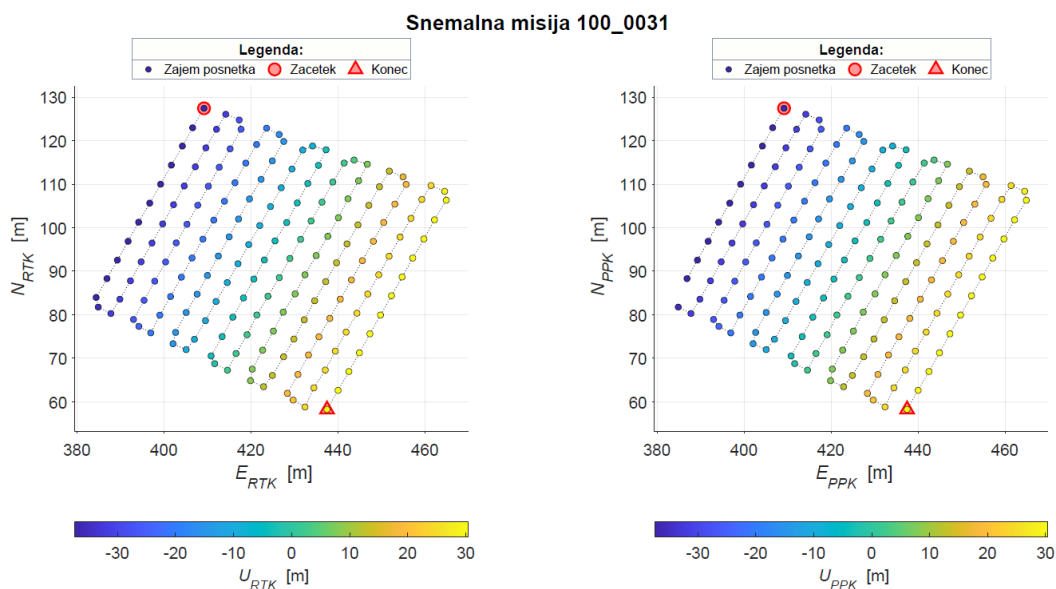
Slika 24: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0017), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo I.



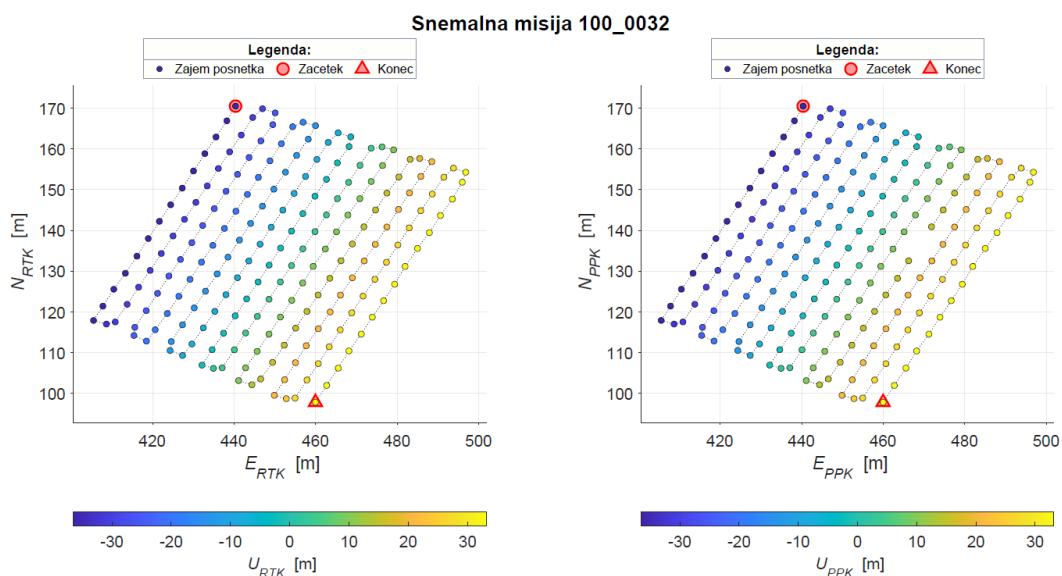
Slika 25: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0017), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo J.

Pri snemalnih misijah 100_0031 in 100_0032 smo opazili, da ne glede na izbiro bazne postaje za PPK (ST1, K in L) vedno manjkajo naknadno določene koordinate istega posnetka. Ker so bile bazne točke za PPK v drugem terminu izmere postavljene na različnih mestih (pod klifom in nad njim), sklepamo,

da so manjkajoče rešitve PPK posledica odsekom slabše kakovosti opazovanj GNSS z letalnika in ne z baze. Za primer je na slikah 26 in 27 prikazan rezultat navezave obeh misij na bazno postajo ST1 (metoda PPK). Isti manjkajoči PPK-položaj posnetka v posamezni misiji zaznamo tudi pri navezavah na točki K in L.



Slika 26: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0031), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.



Slika 27: Položaji letalnika (projekcijski centri zajetih posnetkov snemalne misije 100_0032), določeni z metodo RTK (levo) in PPK (desno). Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.

4.2 Koordinatne razlike med RTK in PPK

V spodnji preglednici 9 so za posamezno snemalno misijo zapisana povprečja absolutnih koordinatnih razlik med obema metodama izmere GNSS. Velike vrednosti razlik opazimo pri misijah 100_0329, 100_0330 in 100_0331, ki so posledica grobih napak, omenjenih v poglavju 4.1. Če slednjih ne upoštevamo se povprečne vrednosti razlik gibljejo 0,003–0,083 m v smeri *E*, 0,003–0,033 m v smeri *N* in 0,007–0,062 m v smeri *U*. Standardni odkloni koordinatnih razlik od njihovih srednjih vrednosti so si v smereh *E* in *N* podobni ter so v povprečju za približno polovico manjši (0,005 m) od standardnih odklonov v smeri *U* (0,011 m).

Preglednica 9: Podatki o snemalnih misijah ter povprečja absolutnih razlik med položaji RTK in PPK

	Snemalna misija	Baze (RTK)	Baze (PPK)	Število posnetkov	Število rešitev (RTK/PPK)	$\overline{\Delta E}$ [m]	$\overline{\Delta N}$ [m]	$\overline{\Delta U}$ [m]
1	100_0327	ST2 (sp.)	A (sp.)	167	167/166	0,003	0,022	0,009
2	100_0328			198	198/198	0,005	0,025	0,013
3	100_0329		B (sp.)	224	224/183	1,340	3,834	0,210
4	100_0330		C (sp.)	83	83/83	0,908	2,601	0,195
5	100_0331			42	42/42	1,402	2,447	0,785
6	100_0332			257	257/257	0,006	0,028	0,007
7	100_0333		D (sp.)	350	350/350	0,007	0,030	0,026
8	100_0334		F (sp.)	321	321/319	0,005	0,022	0,017
9	100_0001	ST3 (sp.)	H (sp.)	166	166/163	0,027	0,018	0,026
10	100_0002			272	272/272	0,024	0,017	0,023
11	100_0411			262	262/262	0,022	0,016	0,023
12	100_0412			88	88/88	0,013	0,011	0,038
13	100_0413			375	375/375	0,014	0,004	0,023
14	100_0017	ST4 (sp.)	I (zg.)	416	27/26	0,065	0,033	0,034
15	100_0017		J (zg.)		170/146	0,062	0,025	0,061
16	100_0018		19	19/17	0,074	0,029	0,054	
17	100_0019		37	37/23	0,083	0,028	0,062	
18	100_0020		233	233/233	0,071	0,022	0,035	
19	100_0021		85	85/85	0,062	0,021	0,031	
20	100_0022		87	87/70	0,060	0,015	0,034	
21	100_0031	ST2 (sp.)	ST1	167	167/166	0,015	0,005	0,022
22	100_0032		(zg.)	197	197/196	0,019	0,003	0,017
23	100_0031		K (sp.)	167	167/166	0,016	0,004	0,018

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 9

24	100_0032	ST2 (sp.)	K (sp.)	197	197/196	0,017	0,004	0,021
25	100_0031		L (zg.)	167	167/166	0,014	0,007	0,016
26	100_0032			197	197/196	0,016	0,006	0,009
Povprečje						0,030	0,017	0,027

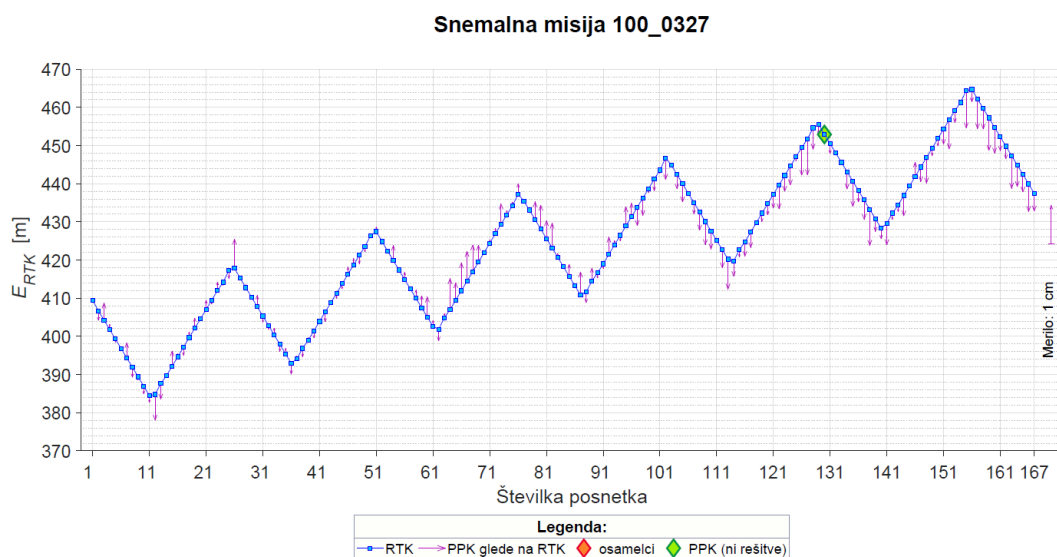
Položaji posnetkov, pridobljeni z metodo PPK, se od rešitev RTK v povprečju vseh misij razlikujejo za 3,0 cm v smeri *E*, kar je skoraj še enkrat več kot v smeri *N* (1,7 cm). Na izračunani vrednosti vplivajo povprečja razlik misij, ki so bile pri RTK-metodi izmere vezane na bazno postajo ST4. Te po velikosti (predvsem v smereh *E* in *U*) izrazito odstopajo od ostalih, kar bomo podrobneje pojasnili pri grafikonih kvartilov (glej poglavje 4.2.2). Če slednje izločimo iz izračuna končnega povprečja ter hkrati izločimo tudi povprečja misij pod zaporedno številko 21, 22, 25 in 26, se v smeri *E* vrednost zmanjša na 1,3 cm. V smeri *N* končno povprečje ostaja enako (1,7 cm), v smeri *U* pa ta znaša 2,0 cm. Zadnje tri vrednosti so izračunane iz rezultatov misij, katerih bazne postaje za RTK in PPK so se nahajale na podobnih lokacijah (pod klifom – spodaj). Ker ne vemo, katera od uporabljenih metod je v danih terenskih razmerah zagotovila točnejše koordinate, lahko le povzamemo, da z obema metodama izmere GNSS, kadar so baze postavljene v bližini ovir, ki motijo sprejem satelitskega signala, določimo podobne položaje letalnika P4RTK. To ne velja v primeru, da bazne točke lociramo na različna mesta (pod klif in nad njim), saj se koordinatne razlike, kot že rečeno, značilno povečajo.

Največjo vrednost koordinatne razlike (12,7 cm) smo zaznali pri višinski komponenti *U* za snemalno misijo 100_0017 z navezavo na točko I. V smeri *E* je največja razlika znašala nekoliko manj, in sicer 9,2 cm za misijo 100_0019. V smeri *N* je izstopala misija 100_0333 z vrednostjo razlike 6,6 cm. Ker s pregledovanjem numeričnih vrednosti koordinatnih razlik ne pridobimo vseh koristnih informacij, smo obnašanje slednjih predstavili s pomenljivimi grafiki v poglavjih 4.2.1 in 4.2.2.

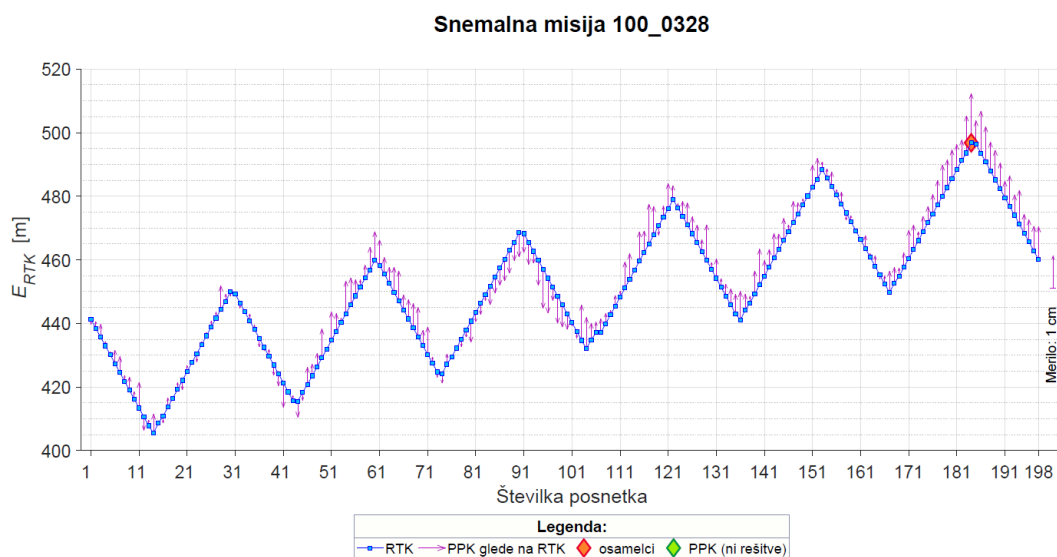
4.2.1 Sosledja razlik v položajih posnetkov po komponentah *E*, *N* in *U*

Prikaz koordinatnih razlik je temeljil na izrisu položajev posnetkov, določenih z RTK-metodo. Izračunane razlike do rešitev PPK smo prikazali s puščicami (magenta), katerih velikost in usmerjenost kažeta na relativen odnos med koordinatami obeh rešitev. Ker so vrednosti razlik v primerjavi z vrednostjo koordinat majhne, smo puščice skalirali s faktorjem 1000 (1 cm v naravi je 10 m na grafikonu). Nekatere položaje RTK smo poudarili z zelenim znakom, ki pomeni odsotnost rešitve PPK zaradi dejavnika, navedenega v poglavju 4.1. Z rdečim znakom smo opozorili tudi na morebitne osamelce oziroma na statistično značilne koordinatne razlike (izrazito majhne ali velike), ki smo jih določili na osnovi izračuna medkvartilnega razmika (glej poglavje 3.5.2).

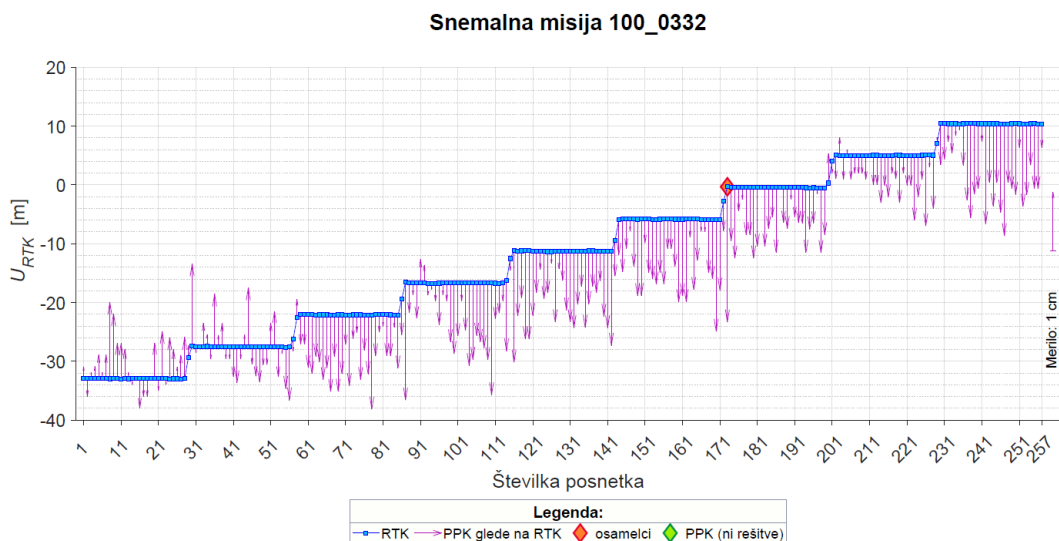
Z analizo grafičnih prikazov koordinatnih razlik po posameznih komponentah smo ugotovili, da se pri več snemalnih misijah pojavljajo večje razlike v položajih RTK in PPK na zavojih letalnika, kjer ta v kratkem času spremeni smer potovanja (orientacijo). Ob nenadni spremembi položaja lahko pride do izgube signala GNSS, kar je v primeru izmere z metodo RTK kompenzirano z napravo INS. Slednja pomaga obdržati približno enak nivo kakovosti določitve položaja skozi celotno misijo. Pri metodi PPK te pomoči ni, zato domnevamo, da je položaj letalnika na krajiščih misije slabše določen in posledično so razlike med obema metodama večje. Izstopajoče razlike na zasukih letalnika smo našli pri misijah 100_0327, 100_0328, 100_0332, 100_0333, 100_0334, 100_0001 in 100_0411. Nekaj primerov podajamo na slikah 28, 29, 30 in 31, kjer je za posamezno misijo predstavljena le tista komponenta položaja, pri kateri so razlike na zavojih najbolj očitne.



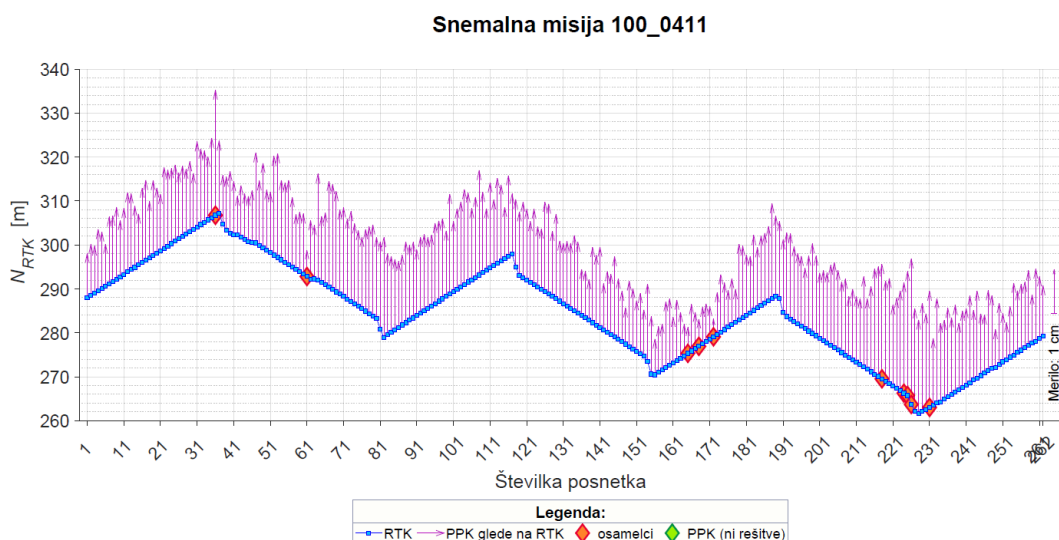
Slika 28: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti E za snemalno misijo 100_0327 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.



Slika 29: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti E za snemalno misijo 100_0328 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.



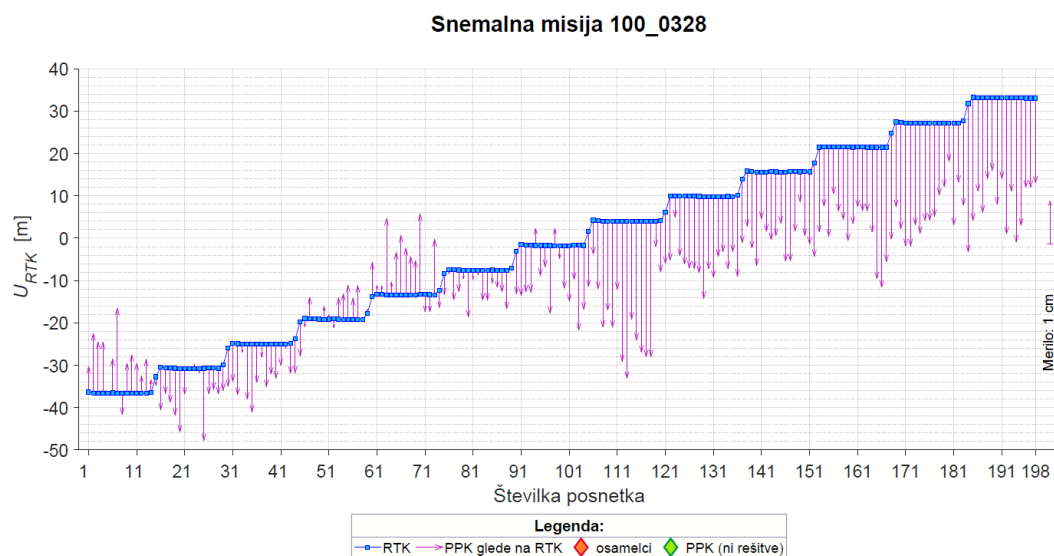
Slika 30: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0332 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo C.



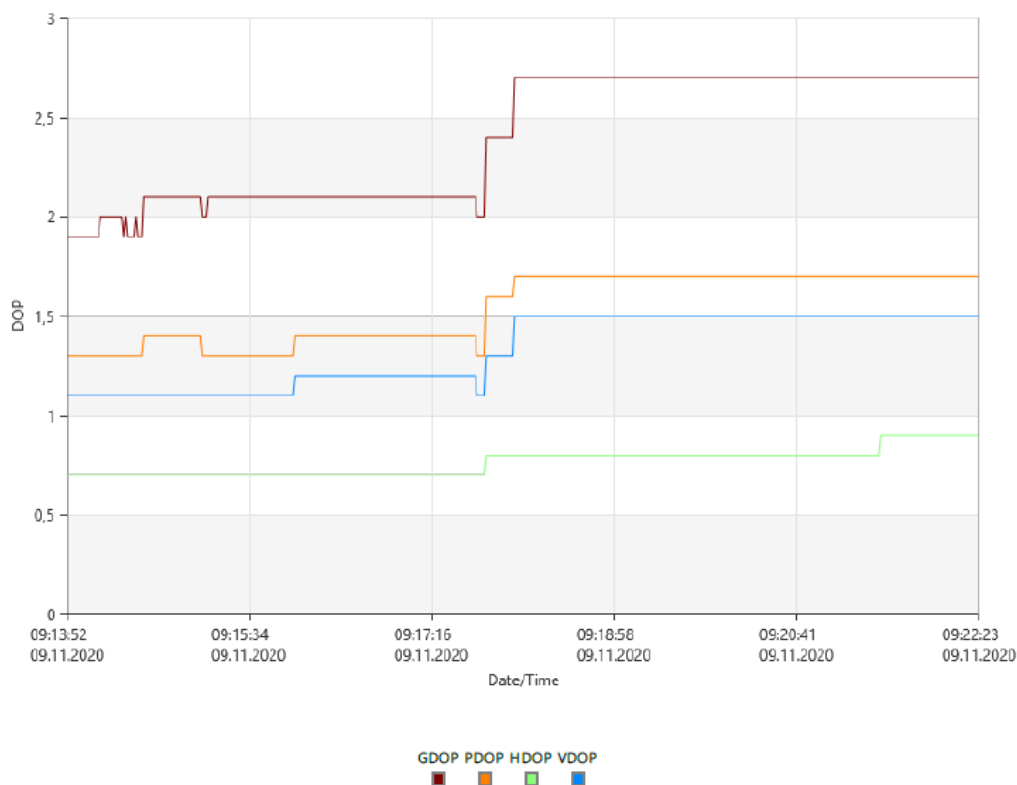
Slika 31: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti N za snemalno misijo 100_0411 – izstopajoče razlike na zavojih. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST3, rešitve PPK na bazo H.

Nenavaden vzorec pojava koordinatnih razlik opazimo pri misijah 100_0328, 100_0333, 100_0412 in 100_0022 (slike 32, 34, 36 in 38). Pri vseh se približno v drugi polovici zajetih posnetkov razlike v koordinatah E , N ali U znatno povečajo. Zgolj v smeri U je omenjen pojav prisoten tudi pri misiji 100_0032 v kombinaciji z baznimi postajami ST1 in L, ki sta se nahajali na vrhu klifa (slike 40, 42 in 44). Pri navezavi na bazo K (pod klifom) teh variacij ne opazimo. Če koordinatne razlike posamezne misije primerjamo z njenim grafikonom geometrijske razporeditve satelitov – faktorji DOP (angl. Dilution of Precision) iz rezultatov naknadne obdelave (metoda PPK), opazimo, da s približnim trenutkom povečanja razlik narastejo tudi vrednosti faktorjev DOP (slike 33, 35, 37 in 39). Zanje velja, da višje kot so, slabša je geometrijska razporeditev satelitov nad točko (v našem primeru nad letalnikom)

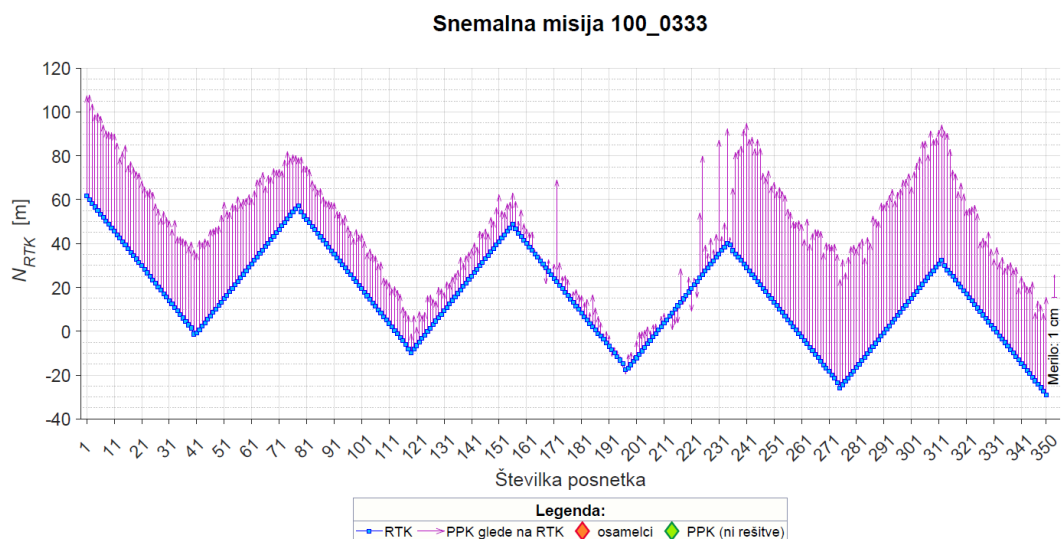
in posledično tudi slabša kakovost določenega položaja. To je še posebej vidno pri misiji 100_0022, pri kateri je vrednost faktorja GDOP (angl. Geometric Dilution of Precision) večja od sedem (slika 39). Za še sprejemljivo naj bi veljala vrednost pet. Poleg znatnih koordinatnih razlik so na zavojih misije 100_0022 in med njimi prisotne oznake za manjkajoče rešitve PPK, kar se ujema z dejstvom o slabi geometriji satelitov. Vrednosti faktorjev DOP se na tem delu sicer zmanjšajo.



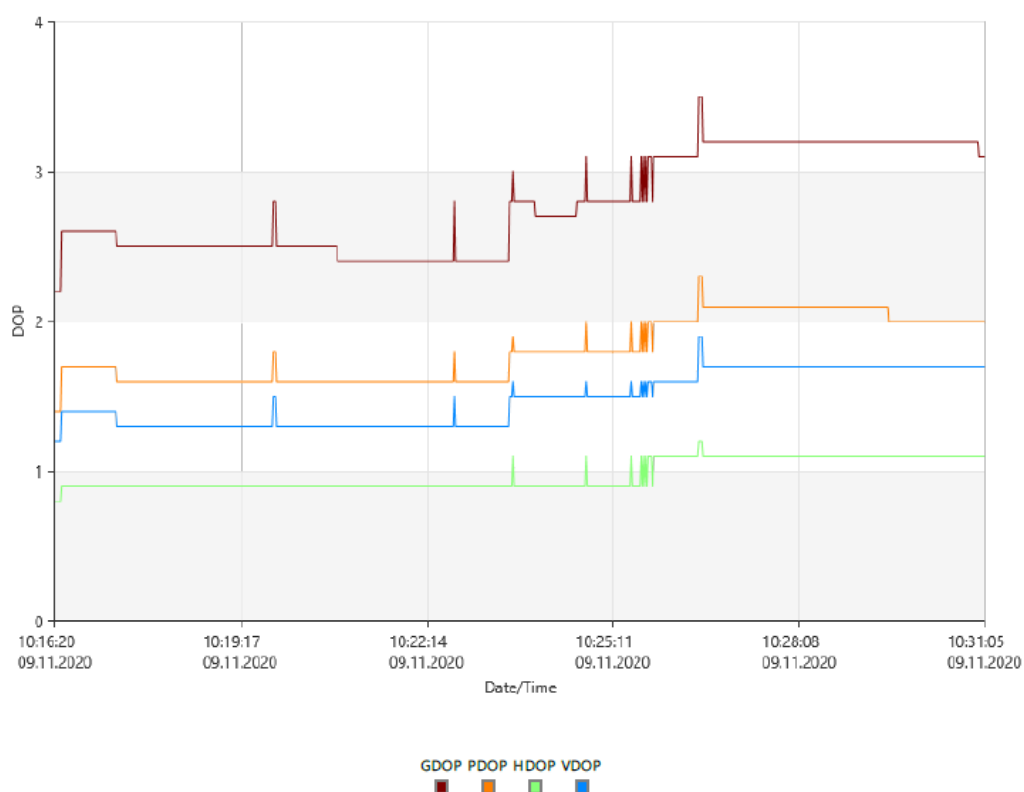
Slika 32: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0328 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo A.



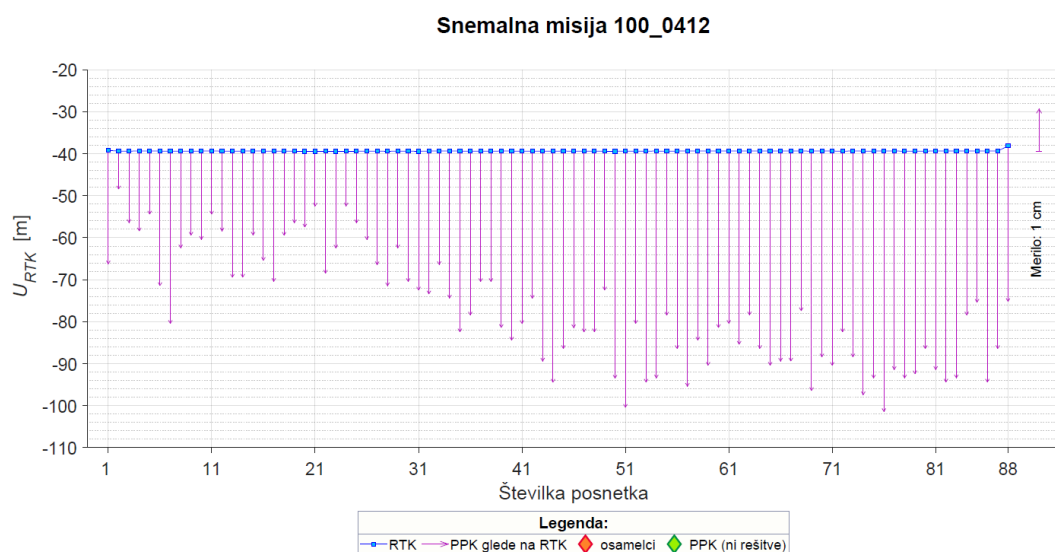
Slika 33: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0328 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo A)



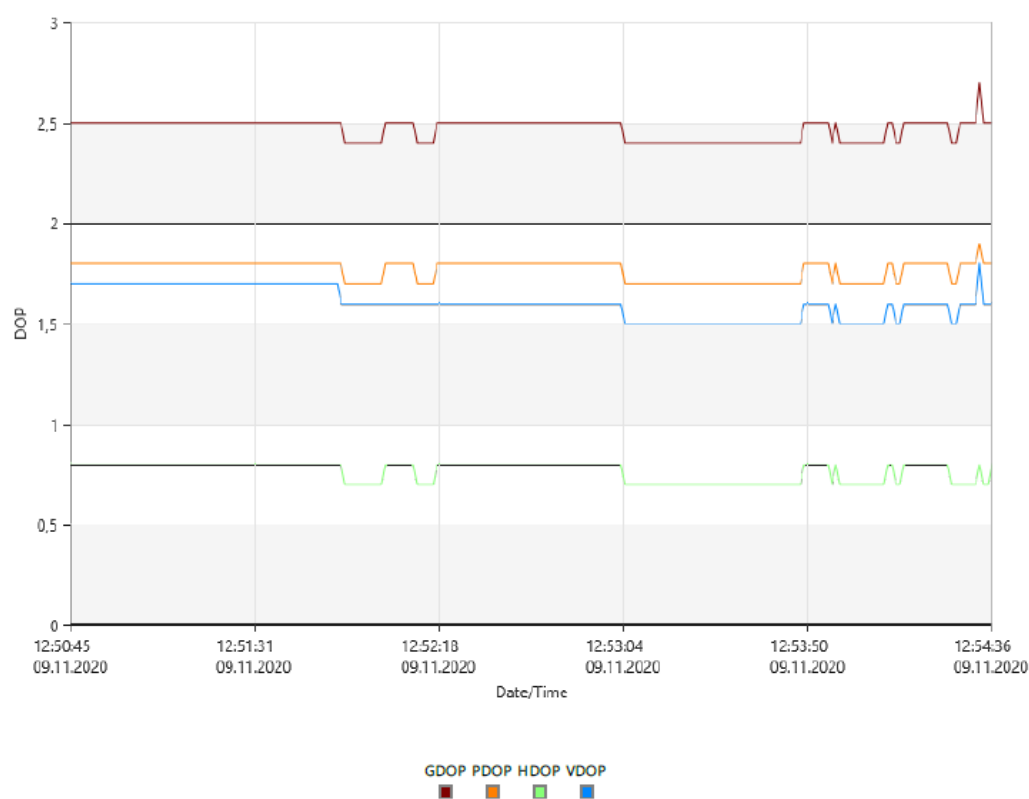
Slika 34: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti N za snemalno misijo 100_0333 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo D.



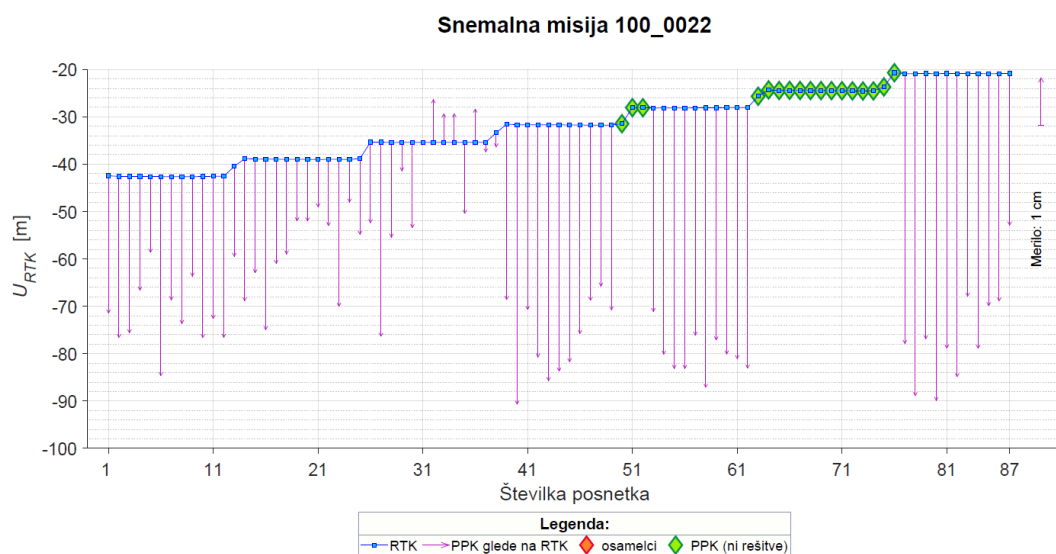
Slika 35: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0333 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo D)



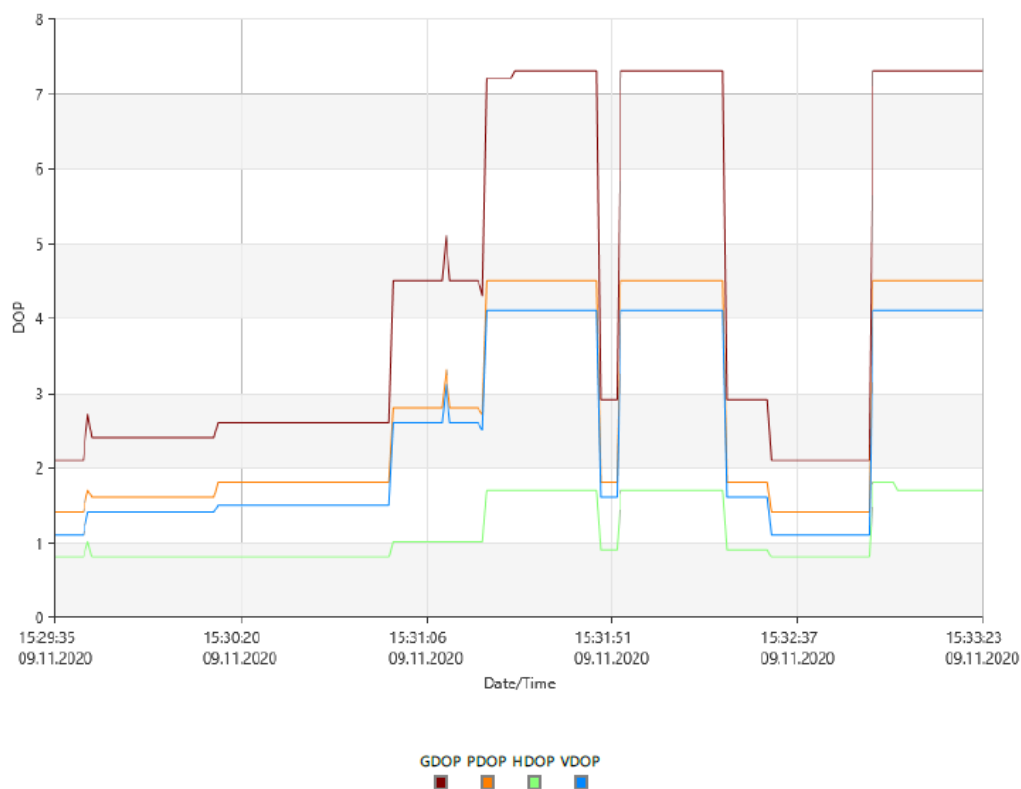
Slika 36: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0412 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST3, rešitve PPK na bazo H.



Slika 37: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0412 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo H)

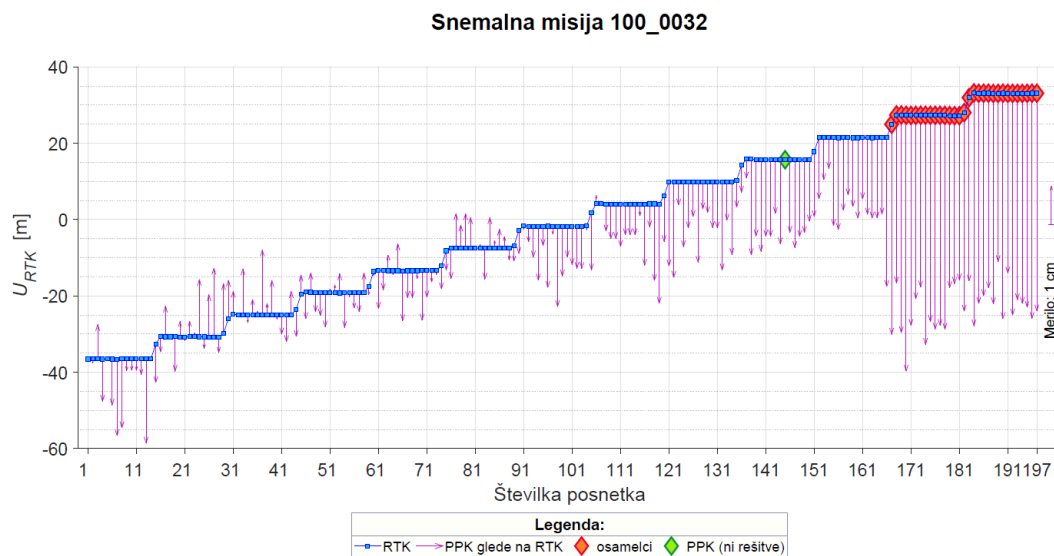


Slika 38: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0022 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST4, rešitve PPK na bazo J.

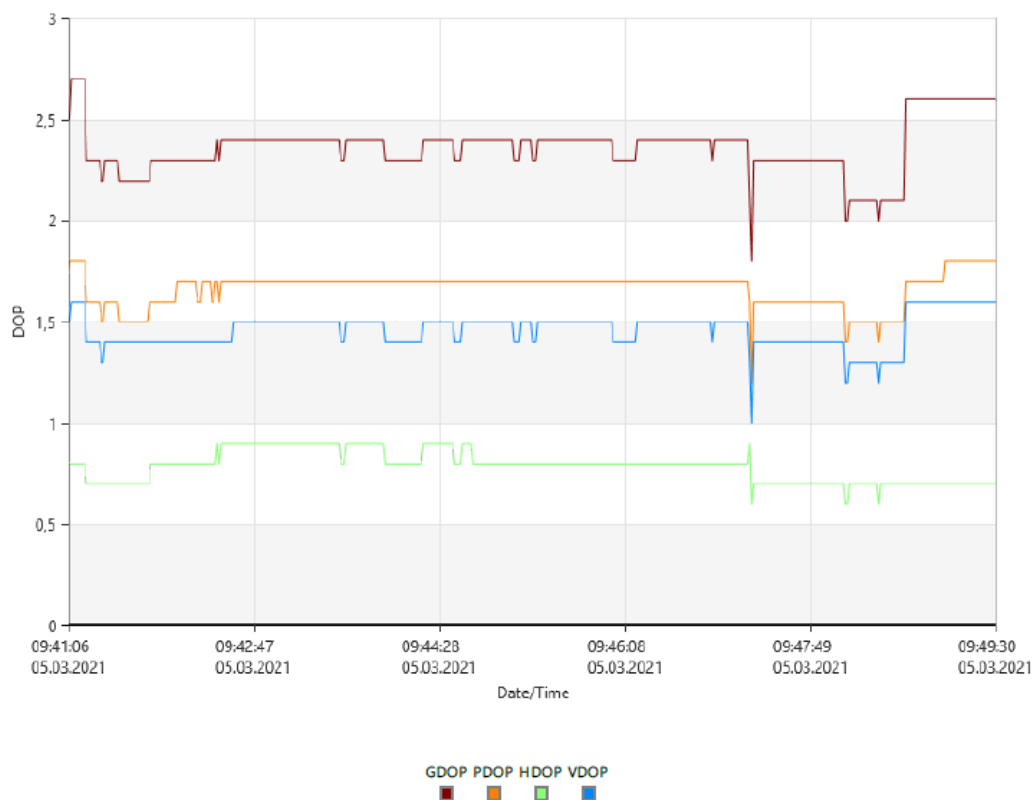


Slika 39: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0022 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo J)

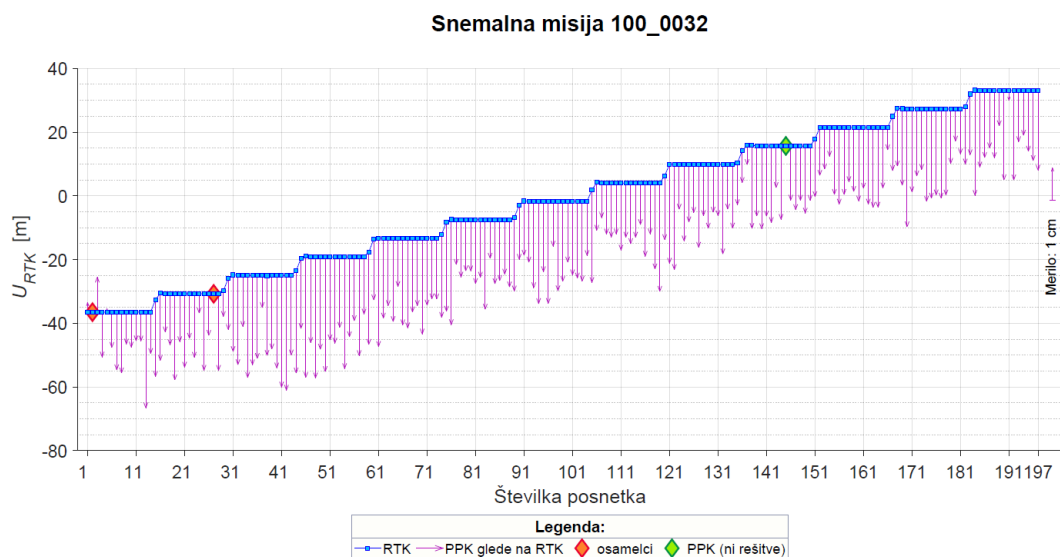
Pri misiji 100_0032 so spremembe v faktorjih DOP manj izrazite (slike 41, 43 in 45).



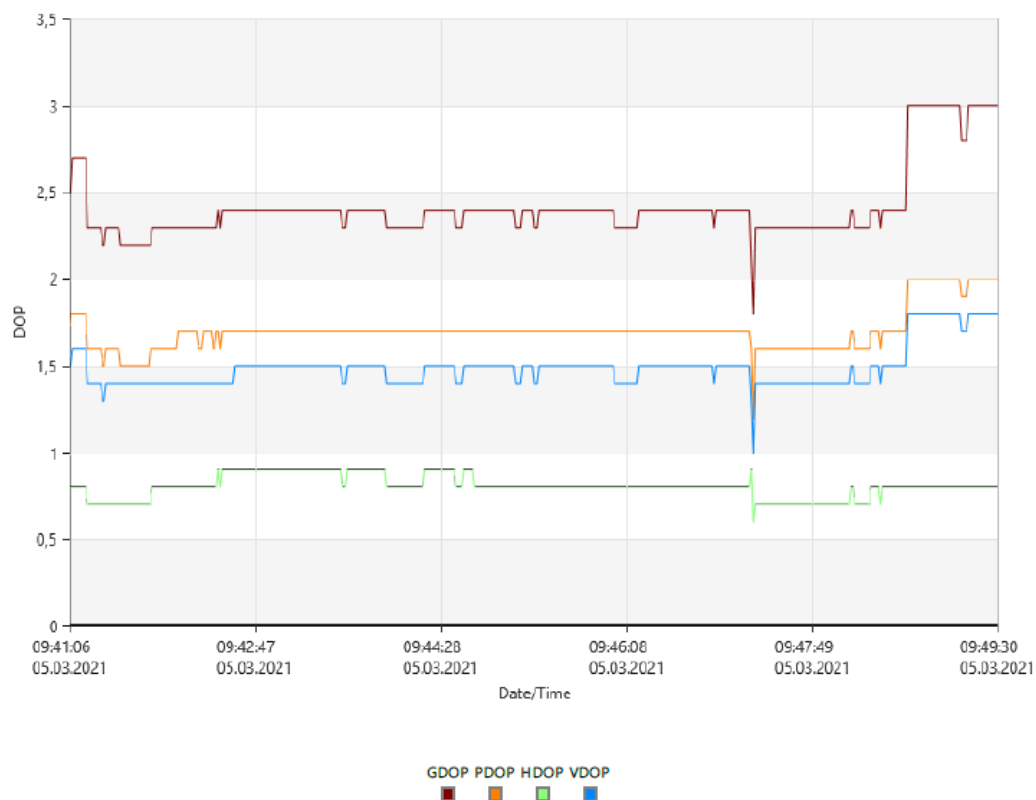
Slika 40: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – velike vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo ST1.



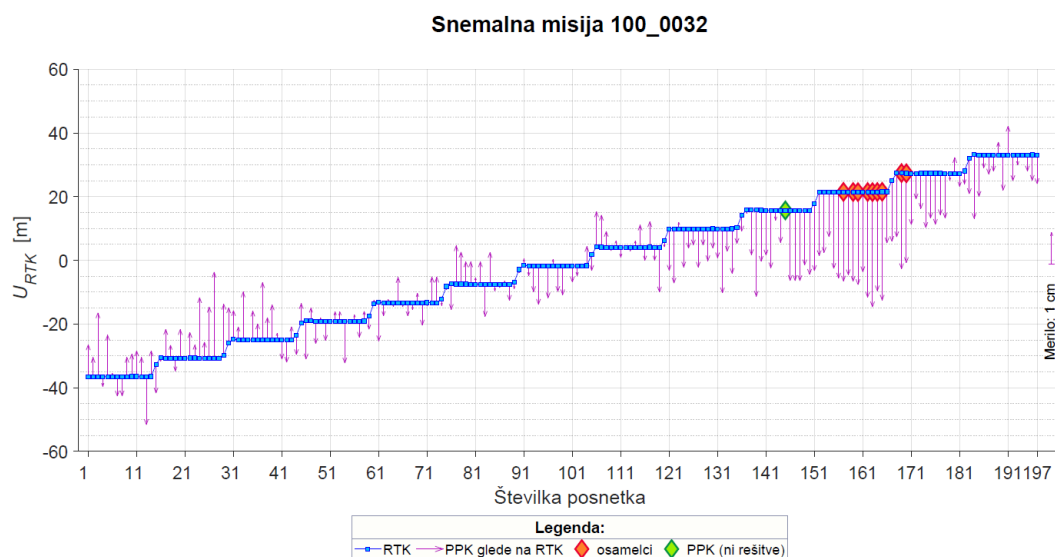
Slika 41: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo ST1)



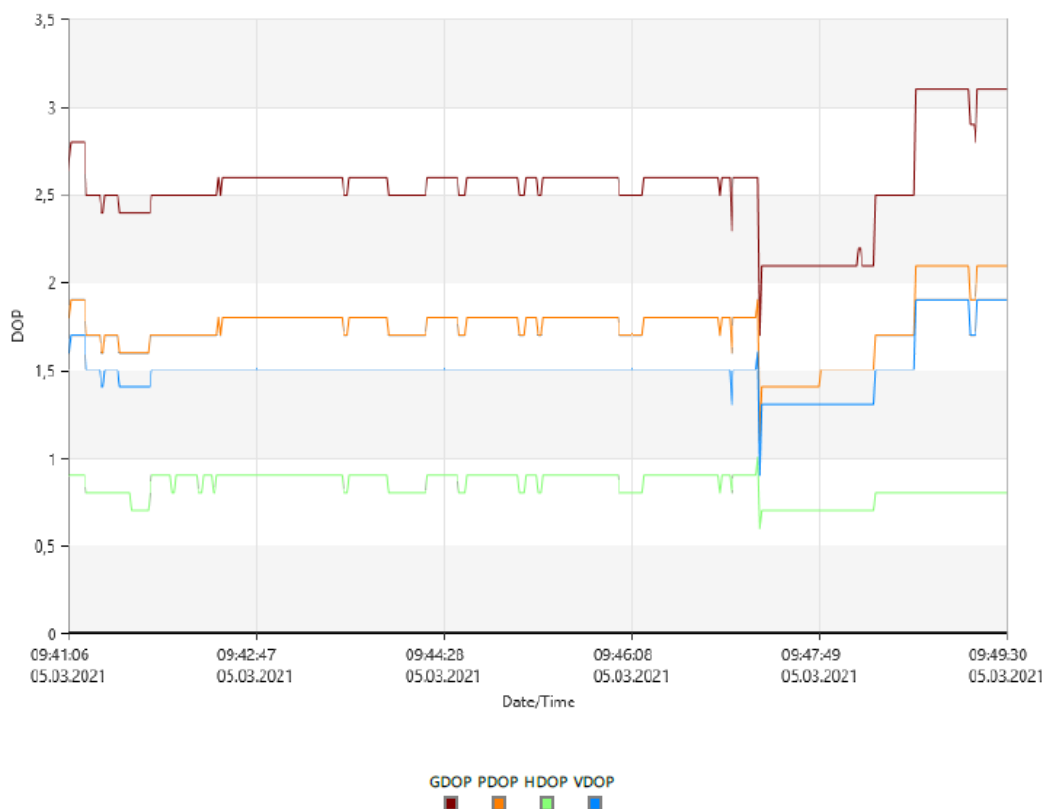
Slika 42: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – enotne vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo K.



Slika 43: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo K)



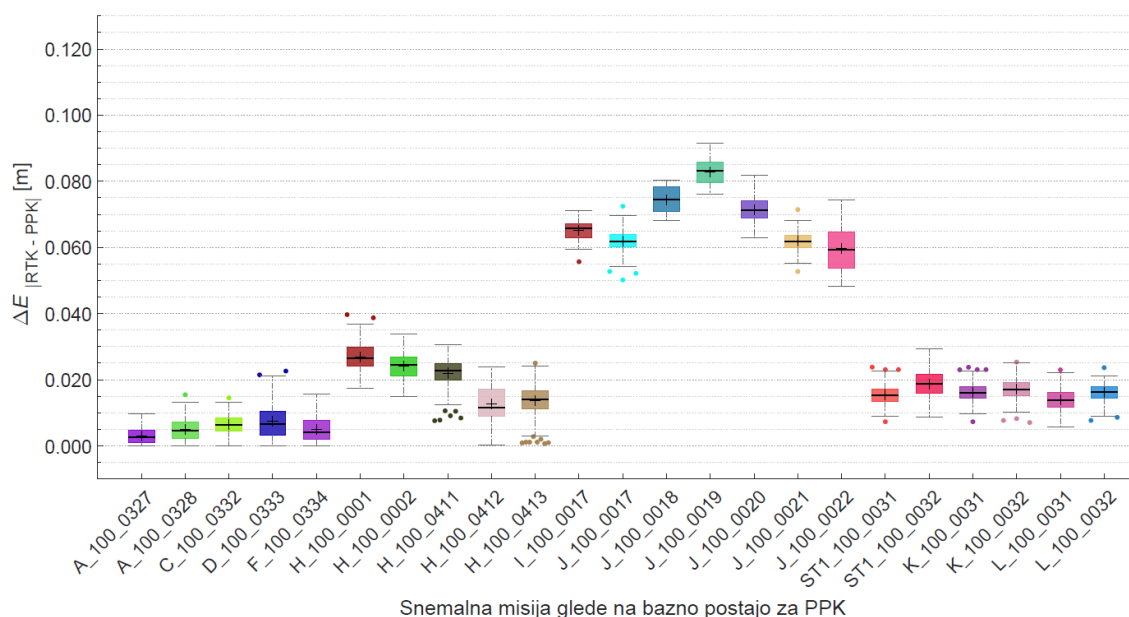
Slika 44: Razlike v koordinatah RTK in PPK po komponenti U za snemalno misijo 100_0032 – enotne vrednosti razlik pri drugi polovici posnetkov. Rešitve RTK se navezujejo na bazo ST2, rešitve PPK na bazo L.



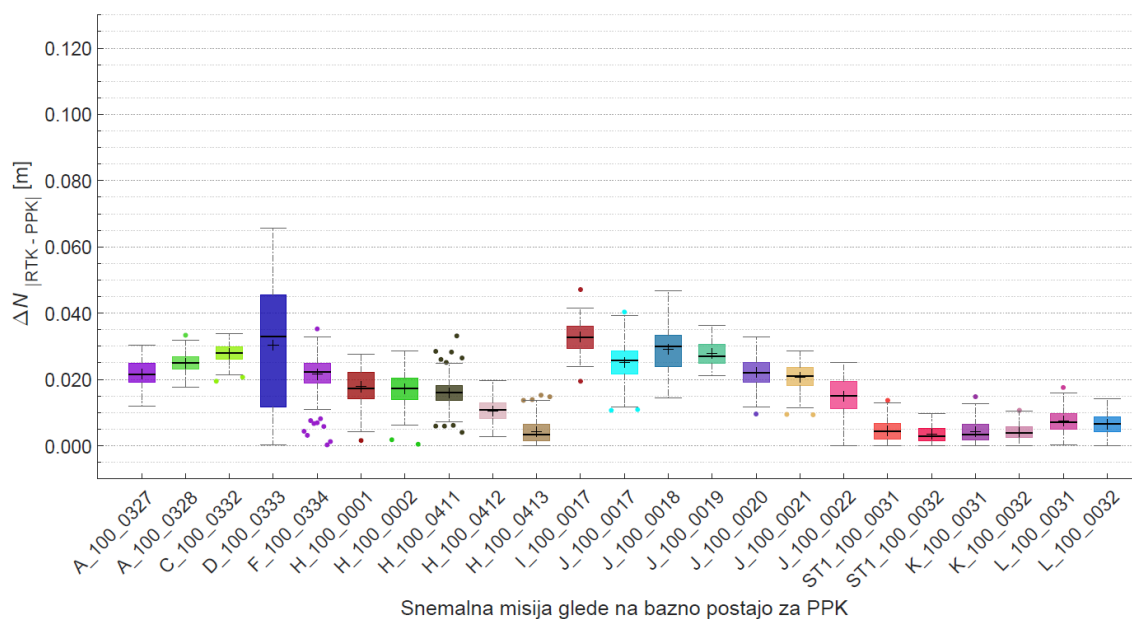
Slika 45: Faktorji DOP na območju snemalne misije 100_0032 (rezultat naknadne obdelave v Leica Infinity z navezavo na bazo L)

4.2.2 Porazdeljenost koordinatnih razlik

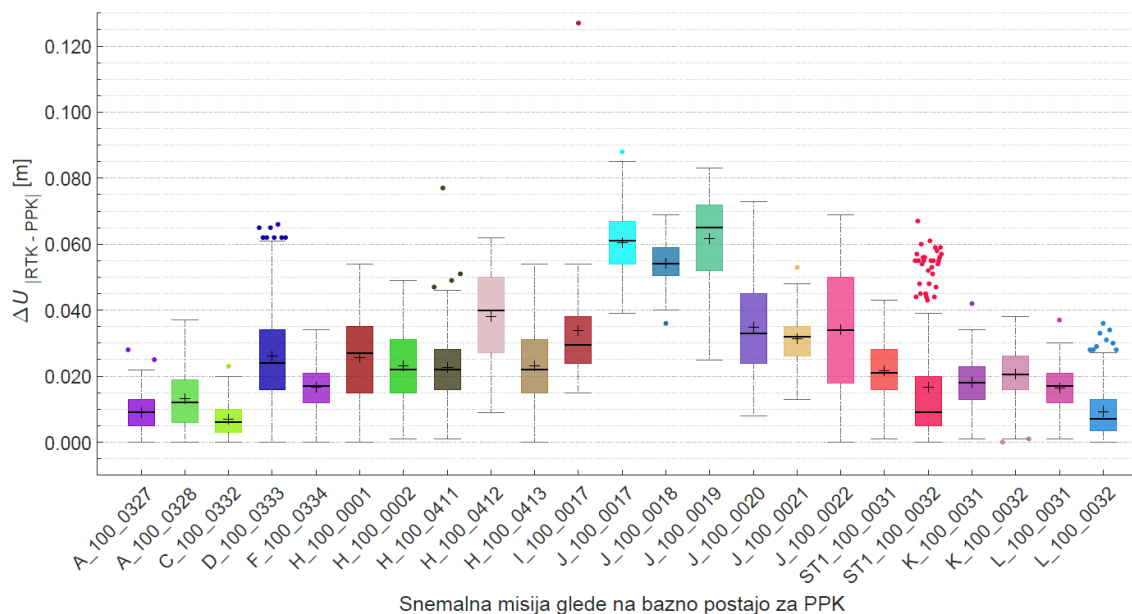
S primerjavo velikosti in razpršenosti absolutnih koordinatnih razlik vseh snemalnih misij (z izjemo misij 100_0329, 100_0330 in 100_0331) smo pri komponenti E (slika 46) opazili izstopajoče koordinatne razlike (približno od 0,060 m do 0,080 m) za misije, vezane na točki I in J (slika 13). Slednji sta se kot edini izmed baznih postaj za PPK v prvem terminu izmere nahajali na vrhu klifa, baza za RTK (ST4) pa je bila postavljena ob obali (slika 12). Na podobno zaprtem območju so bile opravljene tudi misije, vezane na točko H, ki smo jo namestili v bližino baze ST3. Obe točki sta se nahajali ob vznožju klifa in ne daleč stran od baze ST4. V tem primeru smo izračunali precej manjše razlike v smeri E (približno od 0,010 m do 0,030 m). Razlog je verjetno v podobno slabšem sprejemu satelitskega signala na bazah za RTK (ST3) in PPK (H). Glede na to, da sta bili bazi za RTK (ST3 in ST4) postavljeni blizu ena drugi ter nanje vezane misije opravljene na primerljivem terenu (visoke stene klifa proti jugu in jugozahodu), sklepamo, da bi prišlo do večjih koordinatnih razlik tudi v primeru, če bi namesto točke H uporabili neko drugo bazo na območju z boljšim sprejemom signala, kot sta bili to točki I in J. Pri obravnavanih misijah so razlike v smereh N in U (sliki 47 in 48) manj očitne.



Slika 46: Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔE) med RTK in PPK za vse snemalne misije



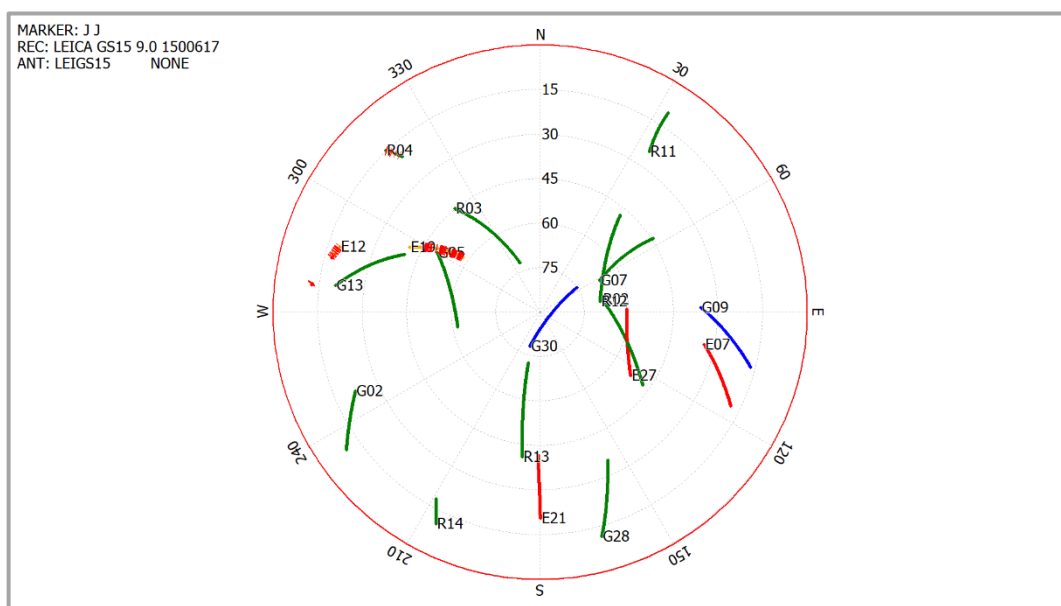
Slika 47: Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔN) med RTK in PPK za vse snemalne misije



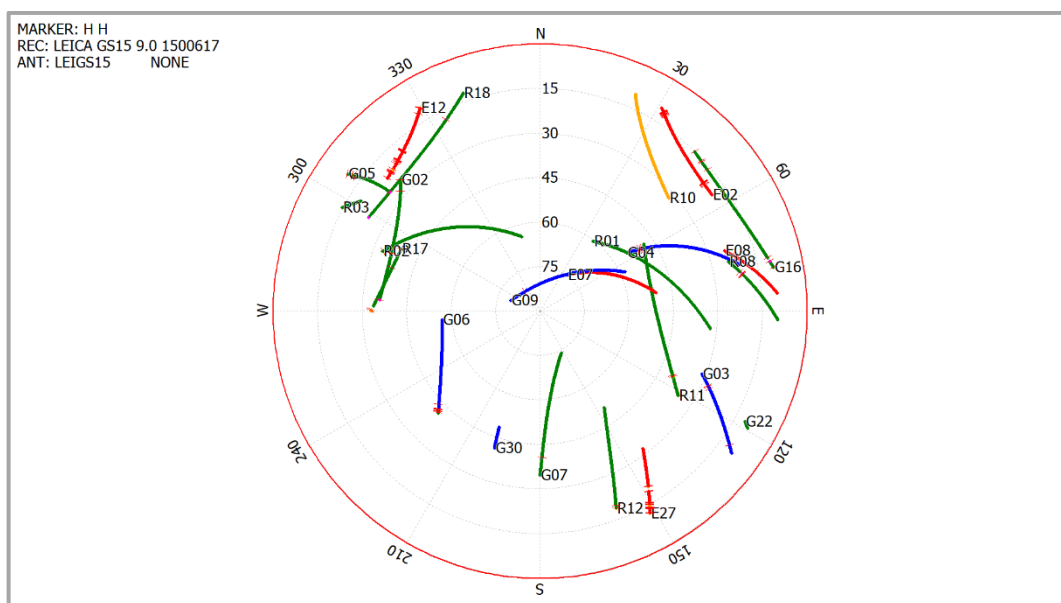
Slika 48: Velikost in razpršenost koordinatnih razlik (ΔU) med RTK in PPK za vse snemalne misije

Na splošno so razlike po višini pri vseh misijah bolj razpršene kot v smereh E in N . Posebnost je misija 100_0333, ki ima v smeri N najbolj neenotne razlike.

S primerjavo vrednosti faktorjev DOP za baze I, J in H smo opazili, da je tekom registracije opazovanj na točki H prišlo do ekstrema (vrednost faktorjev večja od šest). Na slikah 49 in 50 prikazujemo vidnost satelitov GNSS (angl. skyplot) z baznih postaj J in H, ki sta se nahajali na različnih lokacijah. Pri izrisu za bazo H vidimo učinek prisotnosti ovir v njeni okolici proti jugozahodu, saj pod vrednostjo višinskega kota 30° ni vidnih satelitov.



Slika 49: Vidnost satelitov nad bazno postajo J

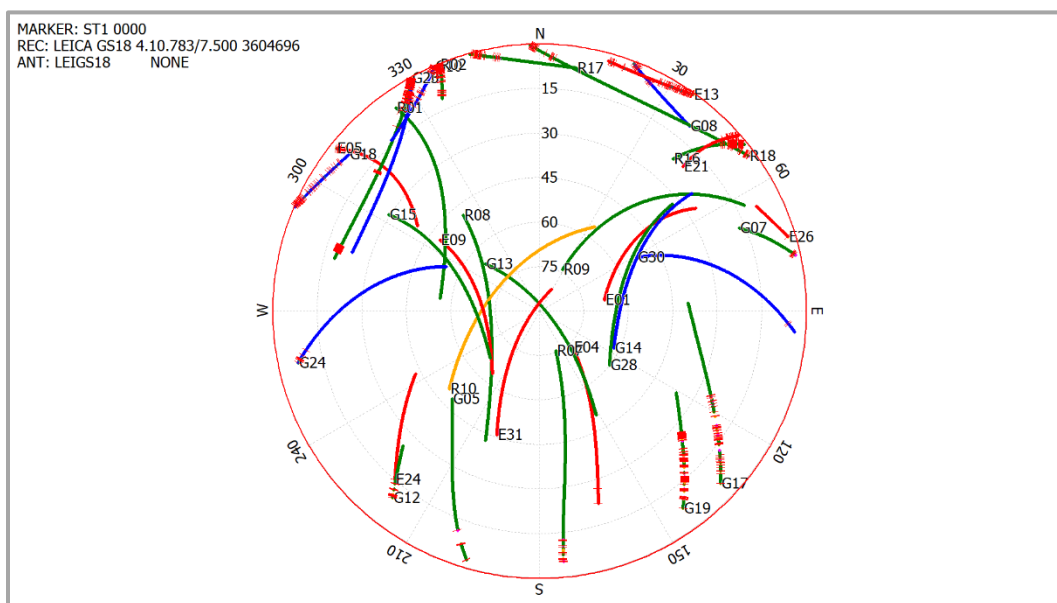


Slika 50: Vidnost satelitov nad bazno postajo H

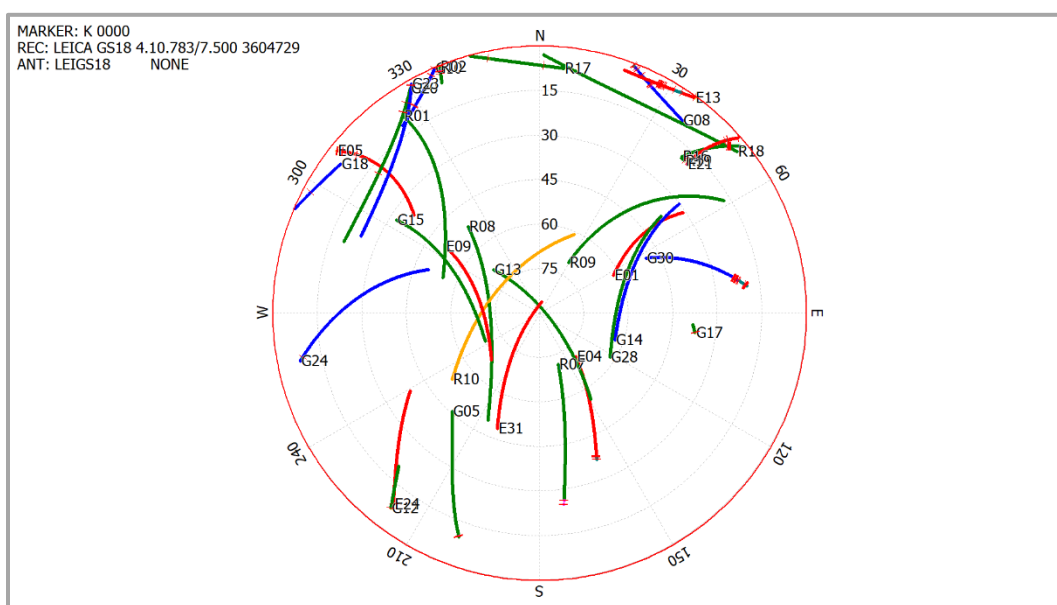
Na območju snemalnih misij 100_0327 in 100_0328 iz prvega termina izmere (2020) smo z načrtno ponovitvijo meritev v drugem terminu (2021) pridobili položaje RTK in PPK za misiji 100_0031 in 100_0032 (slika 11). Meritve RTK so bile vezane na točko ST2 (slika 12), meritve PPK pa na ST1, K in L (slika 13). Da bi prikazali domneven vpliv na rezultate v zvezi z lokacijo bazne postaje, je bila točka K vzpostavljena v bližini baze ST2 ob obali, točki ST1 in L pa sta se nahajali na vrhu klifa. Kljub različni legi baznih točk, so razlike v položajih letalnika dokaj enotne in majhne. V povprečju se gibljejo ~0,005–0,020 m v vseh treh smereh. Predpostavljamo, da je lokacija baze ST2 zaradi nekoliko večje odprtosti območja proti jugozahodu (podobna razporeditev satelitov kot nad bazo K na sliki 52)

ugodnejša od lokacij baz ST3 in ST4, zato je bil položaj letalnika, določen z metodo RTK, kakovostnejši in bolj skladen z rešitvami PPK (tudi ob postavitvi baz na vrhu klifa). V smeri *U* je pri misiji 100_0032 z navezavo na točki ST1 in L vidno večje število osamelcev, ki predstavljajo neobičajne variacije v koordinatnih razlikah proti koncu misije, omenjenih že v prejšnjem poglavju 4.2.1.

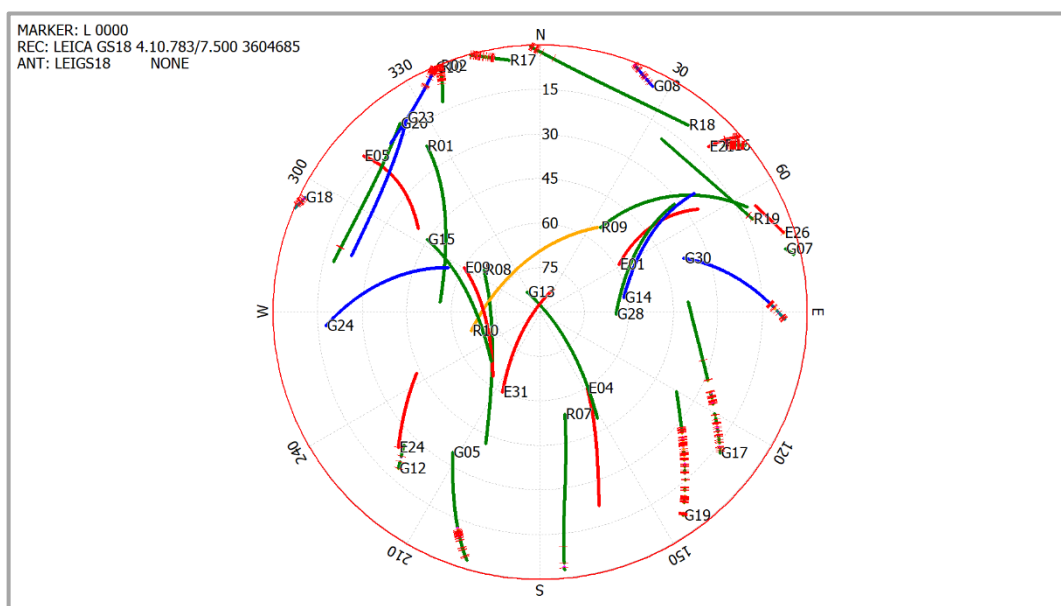
Na spodnjih slikah 51, 52 in 53 prikazujemo vidnost satelitov nad bazami ST1, K in L za čas izvajanja misij 100_0031 in 100_0032. Za razliko od baze H (slika 50) se ovire v okolici baze K nahajajo v smeri jugovzhod. Število satelitov je večje, njihova razporeditev pa boljša.



Slika 51: Vidnost satelitov nad bazno postajo ST1



Slika 52: Vidnost satelitov nad bazno postajo K



Slika 53: Vidnost satelitov nad bazno postajo L

5 ZAKLJUČEK

Direktno georeferenciranje letalnika P4RTK je možno zagotoviti z uporabo vgrajenih modulov RTK in PPK, ki smo ju za našo raziskavo preizkusili na območju Strunjanskega klifa. Določitev položaja z metodo RTK je zelo praktična, saj so koordinate projekcijskih centrov posnetkov, ki jih pridobimo v realnem času, neposredno uporabne za fotogrametrično obdelavo. Pri metodi PPK je proces pridobitve končnih položajev daljši in zamudnejši. Opazovanja GNSS (datoteka Rinex.obs) je potrebno naknadno obdelati, rezultate filtrirati in jih interpolirati na ustrezne časovne trenutke ekspozicij. Na slednje moramo biti še posebej pozorni, saj so lahko grobo pogrešeni zaradi česar so pridobljene rešitve PPK povsem napačne.

Kadar sta bazni postaji za RTK in PPK nameščeni blizu ovir, se rešitve obeh metod med seboj bistveno ne razlikujejo. Povprečne vrednosti razlik v položajih posnetkov znašajo 1,3 cm v smeri *E*, 1,7 cm v smeri *N* in 2,0 cm v smeri *U*. V primeru, da sta bazni postaji za RTK in PPK postavljeni na različnih lokacijah, pri čemer ima ena od njiju boljše pogoje za sprejem signala (večja razpoložljivost satelitov), se razlike v koordinatah znatno povečajo. V našem primeru so v povprečju znašale 6–8 cm v smeri *E* in 3,5–6,5 cm po višini. V smeri *N* so bile razlike manjše 1,5–3,5 cm.

Glede na rezultate analiz zaključujemo, da je kakovost določitve položaja letalnika P4RTK v oteženih pogojih izmere GNSS (prisotnost ovir, ki motijo sprejem signala na bazni postaji in na letalniku) odvisna od lokacije bazne postaje. Z različnimi kombinacijami navezave snemalnih misij smo pokazali, da je v primeru visokih ovir baze za letalnik smiselno postaviti na odprt teren, kjer je kakovost pridobljenih opazovanj GNSS boljša. Točnost rešitev RTK je v težkih terenskih razmerah vprašljiva, zato je za zanesljivo georeferenciranje potrebna vzpostavitev minimalnega števila oslonilih točk, kot jih priporoča sam proizvajalec letalnika P4RTK.

Z uporabo metode PPK velikokrat ne pridobimo vseh položajev zajetih posnetkov, kar se pogosto zgodi na zavojih letalnika, ko ta v kratkem času spremeni orientacijo. Pri naknadni obdelavi smo za interpolacijo položajev in upoštevanje zamikov APC-CMOS uporabili lasten program, saj zaenkrat še ne obstaja prosto dostopnega, ki bi opravil omenjene izračune. Kljub temu lahko na spletni strani Aerotas najdemo javno dostopno datoteko Excel, ki bi jo bilo vredno preizkusiti. Eden od prilagojenih komercialnih programov, ki omogoča korekcijo rešitev PPK za letalnike podjetja DJI, je KlauPPK Software.

VIRI

Aerotas. 2021a. D-RTK 2 Mobile station survey workflow.

<https://www.aerotas.com/dji-d-rtk-2-survey-workflow> (Pridobljeno 28. 6. 2021.)

Aerotas. 2021b. Do you need the DJI D-RTK 2 Base Station?

<https://www.aerotas.com/blog/dji-d-rtk-2-base-station> (Pridobljeno 28. 6. 2021.)

Aerotas. 2021c. Planning ground control points.

<https://www.aerotas.com/planning-ground-control-points> (Pridobljeno 21. 6. 2021.)

Avetics Global. 2021. DJI D-RTK 2.

<https://www.avetics.com/d-rtk2> (Pridobljeno 28. 6. 2021.)

Bartkowiak, A. M. 2015. Why should we multiply the standard deviation by 3 when we calculate the limit of detection?

https://www.researchgate.net/post/Why_should_we_multiply_the_standard_deviation_by_3_when_we_calculate_the_limit_of_detection/55382cf0d767a604268b45cd/citation/download (Pridobljeno 22. 5. 2021.)

Bric, V., Grigillo, D., Kosmatin Fras, M. 2017. Fotogrametrija. Programska zasnova in priprava gradiv za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija geodetov (MSGeo): 21 str.

<https://pdfslide.tips/reader/f/fotogrametrija-spreminjamo-gradbeno-15-fotogrametri-cno-fotografiranje-> (Pridobljeno 25. 2. 2017.)

DJI. 2021a. Phantom 4 RTK.

<https://www.dji.com/si/phantom-4-rtk> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

DJI. 2021b. Phantom 4 RTK FAQ.

<https://www.dji.com/si/phantom-4-rtk/info#faq> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

DJI. 2021c. Wikipedia.

<https://en.wikipedia.org/wiki/DJI#Phantom> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

DJI. 2021d. D-RTK 2 Specs.

<https://www.dji.com/si/d-rtk-2/info> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

DJI Enterprise. 2021. Phantom 4 RTK [White Paper v2].

How PPK works. 2021. Emlid.

<https://docs.emlid.com/reachrs/tutorials/basics/ppk-introduction/> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Ilich, I. 2006. Naravni rezervat Strunjan.

<https://www.gremoven.com/naravni-rezervat-strunjan/> (Pridobljeno 19. 7. 2021.)

Interpolacija in aproksimacija funkcij. 2021. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko.

https://ucilnica.fri.uni-lj.si/pluginfile.php/14624/mod_resource/content/0/interpol.pdf (Pridobljeno 1. 7. 2021.)

Jekeli, C. 2016. Geometric Reference Systems in Geodesy. Študijsko gradivo.

https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/77986/Geom_Ref_Sys_Geodesy_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Pridobljeno 30. 6. 2021.)

Kozmus Trajkovski, K. 2009. Združeni sistemi GNSS/INS za neprekinjeno navigacijo. Geodetski vestnik 53 (2009), 2: 239–252.

http://www.geodetski-vestnik.com/53/2/gv53-2_239-252.pdf (Pridobljeno 26. 2. 2019.)

Kregar, K., Lazar, A. 2018. GEO & IT novice. Geodetski vestnik 62 (2018), 2: 331–335.

http://www.geodetski-vestnik.com/62/2/gv62-2_novice4.pdf (Pridobljeno 21. 6. 2021.)

Kuhar, M. 2019. Časovni sistemi (1). Študijsko gradivo.

Kosmatin Fras, M. 2019a. Aerotriangulacija. Študijsko gradivo.

Kosmatin Fras, M. 2019b. Direktna orientacija merilnih sistemov. Študijsko gradivo.

Kosmatin Fras, M., Drešček, U., Lisec, A., Grigillo, D. 2020. Analiza vplivov na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. Geodetski vestnik 64 (2020), 4: 489–507.

doi:[10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507](https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507) (Pridobljeno 21. 6. 2021.)

Leica Geosystems. 2012. Leica GS15 User Manual. Heerbrugg, Leica Geosystems AG: 98–99.

<file:///C:/Users/User/Downloads/4a96200f988c4a27866fafbeb2d5242a.pdf> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

Leica Geosystems. 2017. Leica GS18 User Manual. Heerbrugg, Leica Geosystems AG: 48–49.
<file:///C:/Users/User/Downloads/4a96200f988c4a27866fafbeb2d5242a.pdf> (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

Linear interpolation. 2021. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_interpolation (Pridobljeno 1. 7. 2021.)

Meyer, T. H. 2002. Grid, ground, and globe: Distances in the GPS era. *Surveying and Land Information Science* 62, 3: 179–202.
https://www.researchgate.net/publication/289101489_Grid_ground_and_globe_Distances_in_the_GPS_era (Pridobljeno 5. 7. 2021.)

Ocalan, T., Tunalioglu, N. 2010. Data communication for real-time positioning and navigation in global navigation satellite systems (GNSS)/continuously operating reference stations (CORS) networks. *Scientific Research and Essays* 5, 18: 2630–2639.
<https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/35B5BC619601>
(Pridobljeno 28. 6. 2021.)

Omrežje SIGNAL. 2021. Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije.
<https://gu-signal.si/> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Pownuk, A., Kreinovich, V. 2017. Why Linear Interpolation? Departmental Technical Reports (CS).
https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2115&context=cs_techrep
(Pridobljeno 1. 7. 2021.)

Przybilla, H.-J., Bäumker, M. 2020. RTK and PPK: GNSS-Technologies for Direct Georeferencing of UAV Image Flights. Conference: FIG Working Week 2020. Amsterdam, the Netherlands, May 10–14, 2020.
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2020/papers/ts01b/TS01B_przybilla_m_anfred_10801.pdf (Pridobljeno 23. 6. 2021.)

PPK Base Station. 2021. Wingtra Knowledge Base.
<https://knowledge.wingtra.com/en/ppk-base-station> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Placing the base. 2021. Emlid.
<https://docs.emlid.com/reachrs/tutorials/basics/placing-the-base/> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Soler, T., Hothem, L. D. 1988. Coordinate Systems Used in Geodesy: Basic Definitions and Concepts. *Journal of Surveying Engineering* 114, 2: 84–97.

doi:[10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(1988\)114:2\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(1988)114:2(84)) (Pridobljeno 5. 7. 2021.)

Seeger, H. 1999. Spatial referencing and coordinate systems. V: Longley, P. A. (ur.), Goodchild, M. F. (ur.), Maguire, D. J. (ur.), Rhind, D. W. (ur.). *Geographical Information Systems. Principles and Technical Issues*. New York, John Wiley & Sons, Inc.: str. 427–436.

https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis_book_abridged/files/ch30.pdf (Pridobljeno 5. 7. 2021.)

Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M., Hernández-Pajares, M. 2011. Transformations between ECEF and ENU coordinates. European Space Agency, Navipedia.

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates

(Pridobljeno 5. 7. 2021.)

Stopar, B. 2017a. Metode geodetske izmere GNSS. Študijsko gradivo.

Stopar, B. 2017b. Referenčni časovni sistemi. Študijsko gradivo.

Stopar, B. 2017c. Referenčni koordinatni sistemi. Študijsko gradivo.

Tomaščík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., Merganič, J. 2019. UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? *Remote Sensing* 2019, 11(6): 721.

doi:[10.3390/rs11060721](https://doi.org/10.3390/rs11060721) (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Unit Conversions. 2021. Hexagon. NovAtel.

<https://novatel.com/support/knowledge-and-learning/unit-conversions> (Pridobljeno 30. 6. 2021.)

Vision Aerial. 2021. What is the Difference Between GCPs, PPK, and RTK? *Industry Information, Surveying & Mapping*.

<https://visionaerial.com/what-is-the-difference-between-gcps-ppk-and-rtk/> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Wingtra. 2020. What's the difference between PPK and RTK drones, and which one is better?

<https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/> (Pridobljeno 1. 6. 2021.)

Xu, G. 2007. *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Second Edition. Berlin, Heidelberg, Springer–Verlag: 340 str.