

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

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

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is a publisher's version PDF file.

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

Pavlovčič Prešeren, P., Mencin, A., Stopar, B. 2010. Analiza preizkusa instrumentarija GNSS-RTK po navodilih standarda ISO 17123-8. Geodetski vestnik, 54, 4: 607-626.

http://www.geodetski-vestnik.com/54/4/gv54-4_607-626.pdf

ANALIZA PREIZKUSA INSTRUMENTARIJA GNSS-RTK PO NAVODILIH STANDARDA ISO 17123-8

ANALYSIS OF GNSS-RTK INSTRUMENTS TESTING ON THE ISO 17123-8 INSTRUCTIONS

Polona Pavlovčič Prešeren, Albin Mencin, Bojan Stopar

UDK: 528.512 GNSS:004.057.2 ISO 17123-8:2007

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

IZVLEČEK

GNSS-instrumente (angl. Global Navigation Satellite System) uvrščamo med standardno terensko geodetsko mersko opremo (poleg elektronskih tahimetrov in nivelirjev), ki jo lahko uporabljamo za vzpostavitev geodetskih mrež in za detajlno izmero. Podobno kot pri drugih geodetskih instrumentih moramo tudi pri GNSS-instrumentih pred izmero ovrednotiti parametre kakovosti instrumentarija oziroma metode kalibracije in/ali s terenskim preizkušanjem. Tako pridobimo podatek o ustreznosti navedenih tehničnih značilnosti proizvajalca in ovrednotimo primernost uporabe GNSS-instrumentov za konkretne potrebe. Mednarodna organizacija za standarde ISO (angl. International Organization of Standardization) je v okviru tehnične skupine 172 in podskupine 6 (ISO/TC 172/SC 6) v letu 2007 predstavila postopke preizkušanja GNSS-merskega instrumentarija za določanje položaja v realnem času, ki temeljijo na oceni kakovosti delovanja strojne in programske opreme posameznega instrumenta. Preizkus lahko opravimo kjerkoli na terenu, kjer so zagotovljeni primerni pogoji za izvedbo GNSS-opazovanj predvsem s stališča čim manjših vplivov na opazovanja z izvorom v okolici. Preizkus tudi ne zahteva dodatnega programskega orodja za obdelavo podatkov meritev, saj je statistično vrednotenje rezultatov opazovanj dokaj enostavno. V prispevku opisujemo teoretične podlage preizkusa GNSS-instrumentov po navodilih standarda ISO 17123-8, ki jih uporabimo za praktični preizkus GNSS-instrumenta.

KLJUČNE BESEDE

GNSS, kalibracija, instrument field testing, real time, ISO/TC 172/SC 6, standard ISO 17123-8

ABSTRACT

GNSS-instruments (Global Navigation Satellite System) are the standard field surveying equipment (in addition to tachymeter and levels) for geodetic network establishment and detail surveying. As in the case of other geodetic instruments, it is essential to pre-analyse GNSS-receiver quality parameters, obtained from laboratory calibration and/or field testing of the specific instrument and/or measuring method. Thus, the relevance of the results, as indicated by manufacturer, is obtained that may explain the suitability of a specific GNSS-instrument for field measurements. In 2007, the International Organization of Standardization (ISO), Technical Committee 172, Subcommittee 6 (ISO/TC 172/SC6), presented a comprehensive GNSS field testing procedures for real time measurements, based on statistical evaluation and verification of the manufacturer's hardware and firmware. The test can be performed anywhere on the field assuming that the test area includes minimal potential influences to GNSS measurements. At the same time, a test does not require any additional processing software, because the test data evaluation is based on elementary statistics. This paper presents the theoretical basis of GNSS instrument testing in accordance with the ISO 17123-8 guidelines and further examination of specific measurements on the selected site.

KEY WORDS

GNSS, kalibracija, terensko preizkušanje instrumentov, realni čas, ISO/TC 172/SC 6, standard ISO 17123-8

1 UVOD

Preverjanje in umerjanje merilnih instrumentov je osnovni pogoj za zagotavljanje kakovosti in sledljivosti merskih rezultatov. Potrebo po preizkušanju instrumentov narekuje dejstvo, da so opazovanja obremenjena s slučajnimi in sistematičnimi vplivi. Nove tehnologije, še posebej GNSS (angl. Global Navigation Satellite System), so zaradi kompleksnosti in raznolikosti merskih instrumentov in metod otežile preizkušanje instrumentov. Obdelava GNSS-opazovanj poteka s programskimi paketi, ki uporabniku praviloma ne omogočajo celovitega vpogleda v postopke obdelave opazovanj, temveč podajajo le nekatere rezultate obdelave opazovanj. Težava je bolj izrazita pri izmerah v realnem času, kjer programska oprema operaterju ponuja le najnujnejše informacije. Tako merski postopek poteka na »slepem« zaupanju tehnologiji ter navedbam proizvajalca instrumenta in/ali programske opreme, ki med izvajanjem meritev prikaže le notranjo natančnost pridobljenih koordinat točk. V izmere v omrežjih permanentnih postaj (v načinu VRS (angl. Virtual Reference Station) ali FKP (nem. Flächen Korrektur Parameter)), kjer določitev položaja poteka na podlagi računsko določenih GNSS-opazovanj v omrežju, ki praktično niso izvedena, je izvedba preizkusa še bolj težavna.

Ker običajni uporabnik GNSS-opreme ne pozna podrobno delovanja posameznih komponent – strojne in programske opreme, preostane v geodetski praksi samo še možnost empirične ocene s preizkušanjem delovanja instrumentov ob različnih pogojih. Mednarodna zveza geodetov FIG (fr. Fédération Internationale des Géomètres) za preverjanje in preizkušanje geodetske opreme predvideva model, predstavljen s štirimi fazami (Heister, 2008):

- prva faza je preprost preizkus delovanja, s katerim ocenimo operativnost, vizualno preverimo opremo in opravimo meritve v kratkih intervalih pred terenskimi meritvami in po njih;
- v drugi fazi, v razširjenem preizkusu, vrednotimo značilne odklone posameznih rezultatov meritev v enakomernih intervalih ali dogodkovni odvisnosti (tj. ciklično ponavljanje posameznega vpliva);
- tretja faza predstavlja kalibriranje ali umerjanje, kjer GNSS-opazovanja primerjamo z referenčnimi (nominalnimi) vrednostmi (Rothacher, 2001);
- četrta faza se navezuje na določitev tehničnih značilnosti instrumentov z namenom pridobitve certifikata za posamezni instrument.

V 8. delu standarda ISO 17123 z naslovom GNSS-terenski merski sistemi v realnem času (angl. GNSS field measurements systems in real time kinematic (RTK)) je opisan preizkus v okviru prvih dveh faz. Standard ISO 17123-8 opisuje terenski preizkus delovanja GNSS-RTK instrumentov za posamezno delovišče brez posebne dodatne opreme, saj je vodilo preverjanje ustreznosti rezultatov izmere glede na navedbe proizvajalca. Preizkusa ne smemo enačiti s kalibracijo instrumenta (tretjo fazo FIG), kjer GNSS-opazovanja (kodna, fazna, Dopplerjeva) primerjamo z referenčnimi vrednostmi.

V prispevku opisujemo teoretične osnove in praktični preizkus GNSS-RTK instrumenta po navodilih standarda ISO17123-8. Ker z GNSS-metodo izmere pridobimo koordinate v novem koordinatnem sistemu D96/TM, se v nadaljevanju uporabljene oznake razlikujejo od oznak v

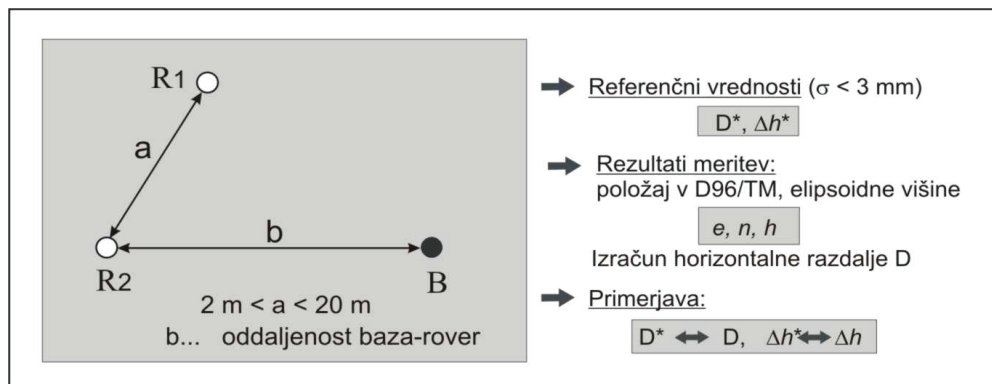
standardu. V standardu je položaj opisan s koordinatama x in y ter višina z elipsoidno višino h . Mi smo koordinati x in y zamenjali in ju predstavili z oznakama e in n v koordinatnem sistemu D96/TM, enako kot v standardu pa obravnavamo elipsoidno višino h .

Preizkušanje domnev v standardu temelji na uporabi izrazov, ki se razlikujejo od običajnih postopkov preizkušanja domnev v statistiki. Standard temelji na preizkušanju domnev za standardne odklone, statistično pa preizkušamo domneve za variance. V prispevku smo zato izraze in postopke iz standarda dopolnili s postopki statističnega preizkušanja domnev (Drobne in Turk, 2002); različno obravnavanje istega problema smo v članku predstavili z razdelki, označenimi z dvojnimi črtami.

Prvi praktični preizkus smo opravili na strehi UL FGG (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2), kjer imamo na voljo trajno stabilizirane betonske stebre, in sicer na nekoliko večji oddaljenosti, kot je navedena za primerno v standardu. Točki naj bi bili oddaljeni 20 m, oddaljenost pri nas pa znaša 22,5 m. Za izvedbo meritev na trajno stabiliziranih stebrih smo se odločili zato, da smo se izognili pogrešku centriranja instrumenta. V standardu ni izrecno navedena priporočena izvedba testa glede načina postavitve instrumenta, vendar je način prisilnega centriranja instrumenta s stališča izvedbe meritev najboljši. Med preizkusom se je pojavilo tudi vprašanje o načinu izvedbe RTK-metode izmere. Standard ne določa načina zagotovitve bazne (referenčne) postaje. Bazno postajo v RTK-izmeri lahko zagotovimo sami, vlogo bazne postaje pa lahko privzameta tudi permanentna postaja ali pa znotraj omrežja programsko določena virtualna referenčna postaja VRS. Vsak način ima svoje prednosti in pomanjkljivosti, za namene poznejših ponovitev preizkusa pa bi bilo dobro opredeliti način zagotovitve bazne postaje. Mi smo za bazno postajo privzeli virtualno postajo VRS, določeno v omrežju SIGNAL, zato ker opazovanja postaje VRS niso obremenjena s pogreškom odboja signala od objektov, imenovanega večpotje (angl. multipath). Tako smo iz preizkusa pridobili tudi odgovor o primernosti izbire mikrolokacije točk (streha UL FGG) za izvedbo preizkusa.

2 STANDARD ISO 17123-8

V dokumentu ISO 17123-8 sta opisana dva načina preizkusa, s katerima ugotavljamo, ali GNSS-oprema omogoča doseganje natančnosti, ki jo predvideva proizvajalec. Prvi način imenujemo *poenostavljeni preizkus*, drugi pa *popolni preizkus*. Za oba načina je predpisana enaka razporeditev testnih točk, na katerih bomo izvajali opazovanja. Na sliki 1 je z oznako B predstavljena bazna postaja, ki jo lahko zagotovimo sami ali pa nam jo nadomeščata permanentna postaja ali virtualna referenčna postaja VRS. Z oznako R sta predstavljeni testni točki, na katerih bomo izvajali preizkus instrumenta (rover). Točki z oznako R naj bi bili med seboj oddaljeni od 2 do največ 20 m, medtem ko standard oddaljenosti testnih točk R od točke baznega stojišča B (oznaka b na slikah 1, 2 in 3) ne navaja.



Slika 1: Razporeditev točk za preizkus (B je točka baznega stojišča, z R1 in R2 sta označeni točki, na katerih izvajamo preizkus instrumenta).

Za določitev horizontalne razdalje D in višinske razlike Δh med točkama R1 in R2 naj bi uporabili metode izmere, ki omogočajo doseganje natančnosti opazovanj dolžine in višinske razlike vsaj 3 mm. Tako dobljeni vrednosti dolžine D^* in višinske razlike Δh^* med točkama bosta v nadaljevanju predstavljali referenčni (nominalni) vrednosti za primerjavo z vrednostmi dolžin in višinskih razlik, ki jih bomo dobili posredno z izračuni iz koordinat (e in n v koordinatnem sistemu D96/ TM in elipsoidne višine h), pridobljenih z RTK-meritvami. Nominalni vrednosti D^* in Δh^* se pravzaprav uporabljata le za hitro odkrivanje grobo pogrešenih meritev posameznega poenostavljenega preizkusa in v popolni preizkus instrumenta po standardu ISO17123-8 nista vključeni.

Serijski RTK-meritev sestavlja pet zaporedno izvedenih določitev nizov koordinat (v nadaljevanju meritev), opravljenih zaporedno na točkah R1 in R2. Časovni interval med zaporednimi nizi meritev naj bi znašal približno 5 minut, torej ena serija meritev obsega časovni interval 20 minut. Opisani razpored meritev je bil določen v skladu z dejstvom, da je časovni interval, ki se navezuje na odboj GNSS-signalov od bližnjih objektov (perioda večpotja), vezan na trajanje 20 minut (ISO 17123-8, 2007).

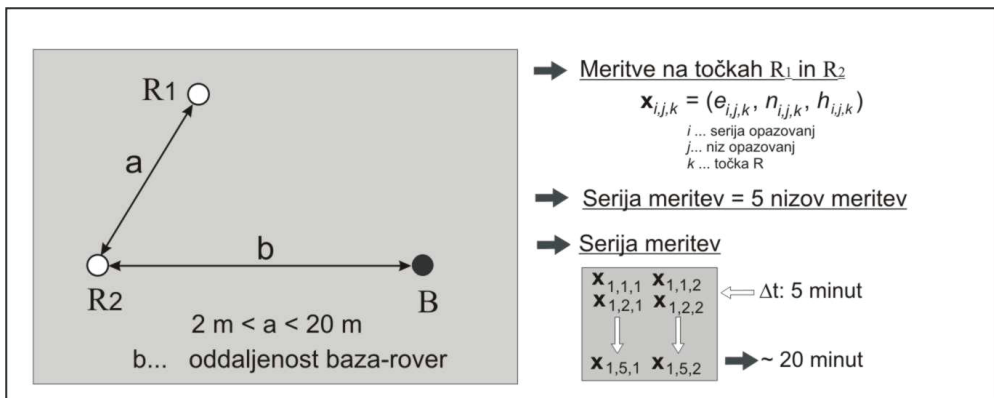
Pri zaporedno izvedenih serijah meritev vsako naslednjo opravimo najmanj 90 minut po začetku prejšnje. Smisel zaporedno izvedenih serij meritev izhaja iz dejstva, da se v daljšem časovnem intervalu spremeni geometrija razporeditve satelitov, hkrati se nekoliko spremenijo vplivi ionosfere in troposfere na GNSS-opazovanja, kar vpliva na končne vrednosti koordinat (ISO 17123-8, 2007). Standardni odkloni posameznih koordinat, izračunanih iz vseh meritev, bodo tako predstavljali kvantitativno oceno kakovosti, ki bo vključevala tudi najbolj tipične vplive na GNSS-opazovanja.

Poenostavljeni preizkus, ki sestoji iz ene serije meritev, je pravzaprav poenostavljeni test delovanja opreme. Namenjen je določitvi zanesljivosti delovanja GNSS-instrumenta, upoštevajoč zunanje vplive v minimalnem obsegu (1. faza FIG). Poenostavljeni preizkus delamo z namenom določitve grobo pogrešenih meritev (koordinat, določenih z RTK). Nasprotno pa tri zaporedno izvedene serije meritev (popolni preizkus) omogočajo določitev značilnih odstopanj zaradi spremenjenih vplivov na GNSS-opazovanja. Popolni preizkus (2. faza FIG) izvajamo z namenom,

da prek delovanja GNSS-instrumenta ob različnih pogojih posredno iz sprememb koordinat preverimo, koliko lahko instrument (programska oprema instrumenta) upošteva in odstrani vplive na GNSS-opazovanja.

2.1 Poenostavljeni preizkus (angl. Simplified test procedure)

Serijski sestoji iz petih nizov meritev na točkah R1 in R2, ki jih opravimo v razmiku pet minut. Vsaka določitev koordinate na točkah R1 in R2 je pridobljena s povprečjem meritev v vsaj petih epohah. Tako izvedba ene serije meritev, to je določitev koordinat na točkah R1 in R2, traja nekoliko več kot 20 minut. Zaporedje meritev predstavljamo na sliki 2.



Slika 2: Izvedba poenostavljenega preizkusa (ena serija meritev).

Posamezne dolžine in višinske razlike, izračunane iz koordinat, primerjamo z referenčnima vrednostma D^* in Δh^* , da določimo grobo pogrešene meritve. Za vsak niz *j* posamezne serije *i* izračunamo horizontalno dolžino *D* in višinsko razliko Δh med točkama R1 in R2:

$$D_{i,j} = \sqrt{(e_{i,j,2} - e_{i,j,1})^2 + (n_{i,j,2} - n_{i,j,1})^2}$$

$$\Delta h_{i,j} = h_{i,j,1} - h_{i,j,2} \quad i = 1 \text{ ali } 2 \text{ ali } 3$$

$$\varepsilon_{D_{i,j}} = D_{i,j} - D^* \quad j = 1, \dots, 5$$

$$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}} = \Delta h_{i,j} - \Delta h^*,$$
(1)

kjer so:

$e_{i,j,k}, n_{i,j,k}$ položajni koordinati v koordinatnem sistemu D96/TM za serijo *i*, niz *j* in točko *k* (R1 ali R2),

$h_{i,j,k}$ elipsoidna višina za serijo *i* in niz *j* na točki *k* (R1 ali R2),

$D_{i,j}, \Delta h_{i,j}$ izračunani vrednosti horizontalne dolžine in višinske razlike med R1 in R2 za niz *j* serije *i*,

$D^*, \Delta h^*$ referenčni (nominalni) vrednosti horizontalne dolžine in višinske razlike med R1 in R2 in

$\varepsilon_{D_{i,j}}, \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$ odstopanji izračunane dolžine in višinske razlike glede na referenčni vrednosti.

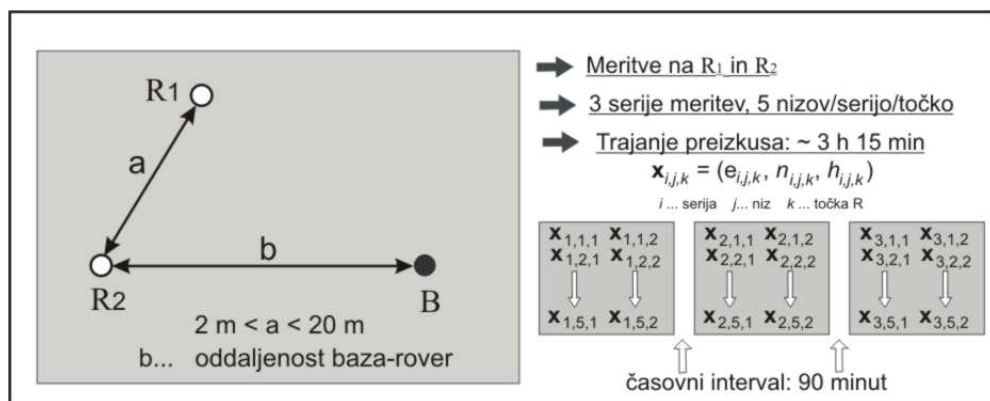
Če odstopanji horizontalne dolžine $\varepsilon_{D_{i,j}}$ in višinske razlike $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$ ne ustrežata meriloma v enačbi (2), sklepamo, da so prisotne grobo pogrešene meritve, zato je postopek preizkusa treba ponoviti. Merili zapišemo kot:

$$\begin{aligned} |\varepsilon_{D_{i,j}}| &\leq 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{e,n} \\ |\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}| &\leq 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{\Delta h} \end{aligned} \quad (2)$$

kjer sta $\sigma_{e,n}$ in $\sigma_{\Delta h}$ predhodno določeni vrednosti standardnih odklonov. Pridobljeni sta lahko iz že opravljenega popolnega preizkusa ali pa privzamemo vrednosti, ki ju podaja proizvajalec.

2.2 Popolni preizkus (angl. Full test procedure)

Za popolni preizkus je treba opraviti tri zaporedne serije meritev (časovni interval med pričetki posameznih serij mora znašati najmanj 90 minut). V okviru ene serije je zaporedje meritev enako zaporedju, predstavljenemu v poenostavljenem preizkusu (slika 2). Zaporedje meritev popolnega preizkusa predstavljamo na sliki 3.



Slika 3: Popolni preizkus (tri serije meritev).

Tu določimo standardni odklon posameznega horizontalnega položaja oziroma višine točk R₁ in R₂. Preizkus razdelimo v tri korake:

- V prvem koraku vsako vrednost dolžine in višinske razlike primerjamo z referenčno vrednostjo, da lahko sklepamo o prisotnosti grobo pogrešenih koordinat (poenostavljeni preizkus).
- V drugem koraku pridobimo statistično oceno koordinat (srednjo vrednost koordinat) iz koordinat točk R₁ in R₂, pridobljenih v vseh serijah (v treh serijah določitev koordinat za posamezno točko pridobimo 15 vrednosti za vsako koordinato). Nato izračunamo:

a) aritmetično sredino ali vzorčno povprečje za posamezno koordinato:

$$\bar{e}_k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 e_{i,j,k}, \quad \bar{n}_k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 n_{i,j,k}, \quad \bar{h}_k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 h_{i,j,k} \quad k = 1, 2 \quad (3)$$

b) odstopanja od srednje vrednosti koordinat:

$$\begin{aligned} r_{e_{i,j,k}} = \bar{e}_k - e_{i,j,k} \quad r_{n_{i,j,k}} = \bar{n}_k - n_{i,j,k} \quad r_{h_{i,j,k}} = \bar{h}_k - h_{i,j,k} \quad i = 1, 2, 3 \\ j = 1, \dots, 5 \\ k = 1, 2 \end{aligned} \quad (4)$$

c) število prostostnih stopenj:

$$v_e = v_n = v_h = (m \cdot n - 1) \cdot p = (3 \cdot 5 - 1) \cdot 2 = 28,$$

kjer je m število serij (3), n število nizov v seriji (5) in p število točk, kjer smo opazovali (R1 in R2).

- V tretjem koraku določimo variance vzorca s^2 ali standardne odklone $s = \sqrt{s^2}$ posameznih koordinat:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m \cdot n \cdot p} r_e^2}{v_e}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_e^2}{28}} \quad s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_n^2}{28}} \quad s_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_h^2}{28}} \quad (5)$$

Standardne odklone standard ISO obravnava posebej za položaj $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}$ in višino $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h}$:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} = \sqrt{s_e^2 + s_n^2} \quad (6)$$

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} = s_h$$

Z izvedbo popolnega preizkusa lahko vpliv ionosferske in troposferske refrakcije na opazovanja zanemarimo, zmanjšamo pa vplive trenutne geometrijske razporeditve satelitov, vpliv nenatančne določitve položajev satelitov na tirnici ter vplive na opazovanja z izvorom v okolici, predvsem vpliv večpotja. Pri tem ostaneta nepojasnjena odgovora na vprašanje o natančnosti opazovanj na bazni postaji (lastna ali permanentna bazna postaja) in na vprašanje o kakovosti s strani računskega centra omrežja permanentnih postaj izračunanih količin (VRS ali FKP).

2.3 Statistični testi

Statistične teste opravimo posebej za horizontalni položaj in elipsoidno višino h , ko imamo na voljo opazovanja za popolni preizkus. Standardna odklona ali variance za horizontalni položaj (e, n) in elipsoidno višino h lahko pridobimo iz meritev z istim ali z več instrumenti različnih tipov in/ali proizvajalcev. Pri določitvi natančnosti instrumenta v okviru trenutnih danih pogojev izmere uporabimo testno statistiko, ki se porazdeljuje po porazdelitvi χ^2 (statistični test χ^2). Pri oceni natančnosti instrumenta v različnih časovnih obdobjih in posledično ob različnih pogojih za opazovanja (več serij meritev z istim instrumentom) pa uporabimo testno statistiko, ki se porazdeljuje po porazdelitvi F (statistični test F). Enako ravnamo, ko primerjamo natančnosti različnih instrumentov ob enakih pogojih (Heister, 2008).

S statističnimi testi želimo odgovoriti na vprašanja:

a) Ali je iz meritev izračunani standardni odklon $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}$ za posamezni horizontalni

položaj (e, n) enak pripadajoči vrednosti $\sigma_{e,n}$, ki jo podaja proizvajalec ali pa smo jo določili s predhodno opravljenim testom? V standardu sta podani ničelna in alternativna domneva kot:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} &\leq \sigma_{e,n} \\ H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} &> \sigma_{e,n} \end{aligned} \quad (7)$$

Standard temelji na pogoju:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} \leq \sigma_{e,n} \cdot \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha; (v_e+v_n)}^2}{v_e + v_n}} \quad (8)$$

Če je pogoj izpolnjen, ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti s tveganjem α , če pa ni izpolnjen, ničelno domnevo H_0 zavrnemo in sprejmemo alternativno H_1 s tveganjem α .

Z upoštevanjem števila prostostnih stopenj $v_e + v_n = 56$ in kritične vrednosti χ^2 pri tveganju $\alpha = 5\%$ ($\chi_{0,95;56}^2 = 74,47$), izračunamo $\sqrt{\frac{\chi_{0,95;56}^2}{56}} = 1,15$ in pogoj preoblikujemo v:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} \leq \sigma_{e,n} \cdot 1,15. \quad (9)$$

Odgovorimo pa lahko tudi z ustaljenim statističnim načinom preizkušanja domnev, kjer ničelno in alternativno domnevo preizkušamo za variance in ju zato zapišemo drugače kot v standardu:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2 &= \sigma_{e,n}^2 \\ H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2 &> \sigma_{e,n}^2 \end{aligned} \quad (7^*)$$

Po obrazcu izračunamo testno statistiko $H: H = \frac{(v_e + v_n) \cdot s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2}{\sigma_{e,n}^2}$. Vrednost testne statistike primerjamo s kritično vrednostjo $\chi_{1-\alpha; (v_e+v_n)}^2$. Če testna statistika pade v kritično območje, ničelno domnevo zavrnemo in sprejmemo alternativno domnevo s tveganjem α . Če vrednost testne statistike ne pade v kritično območje, ničelne domneve ne moremo zavrniti s tveganjem α .

b) Ali je iz vzorca opazovanj izračunani standardni odklon $\sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h}$ za elipsoidno višino h enak pripadajoči vrednosti σ_h , ki jo podaja proizvajalec? V standardu sta podani ničelna in alternativna domnevo kot:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} &\leq \sigma_h \\ H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} &> \sigma_h \end{aligned} \quad (10)$$

Če v standardu postavljeni pogoj:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} \leq \sigma_h \cdot \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha; v_h}^2}{v_h}} \quad (11)$$

- je izpolnjen, ničelne domneve H_0 ne moremo zavriniti s tveganjem α ;
- ni izpolnjen, ničelno domnevo H_0 zavravimo in sprejmemo alternativno H_1 s tveganjem α .

Pri številu prostostnih stopenj ($v_h = 28$) in kritični vrednosti χ^2 za $\alpha = 5\%$ ($\chi_{0,95;28}^2 = 41,34$)

izračunamo $\sqrt{\frac{\chi_{0,95;28}^2}{28}} = 1,22$ in zgornji pogoj zapišemo kot:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq \sigma_h \cdot 1,22. \quad (12)$$

Domnevo lahko preizkusimo z ustaljenim statističnim načinom preizkušanja domnev, ki ju zato zapišemo drugače kot zgoraj:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2 &= \sigma_h^2 \\ H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2 &> \sigma_h^2 \end{aligned} \quad (10^*)$$

Izračunamo testno statistiko H po obrazcu: $H = \frac{v_h \cdot s_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2}{\sigma_h^2}$. Vrednost testne statistike

primerjamo s kritično vrednostjo $\chi_{1-\alpha;v_h}^2$. Če testna statistika pade v kritično območje, ničelno domnevo zavravimo in sprejmemo alternativno domnevo s tveganjem α . Če vrednost testne statistike ne pade v kritično območje, ničelne domneve ne moremo zavriniti s tveganjem α .

c) Ali standardna odklona dveh vzorcev horizontalnega položaja $\sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}$ in $\tilde{\sigma}_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}$, ki se nanašata na meritve na isti točki in sta bila določena iz dveh popolnih preizkusov meritev, spadata v isto populacijo ob predpostavki, da imata vzorca enako število prostostnih stopenj ($v_e + v_n$ in $\tilde{v}_e + \tilde{v}_n$)? V standardu izhajajo iz ničelne in alternativne domneve, ki sta zapisani na podlagi standardnih odklonov:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{e,n} &= \tilde{\sigma}_{e,n} \\ H_1: \sigma_{e,n} &\neq \tilde{\sigma}_{e,n} \end{aligned} \quad (13)$$

Če pogoj:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2;(v_e+v_n);(\tilde{v}_e+\tilde{v}_n)}} \leq \frac{s_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}^2} \leq F_{1-\alpha/2;(\tilde{v}_e+\tilde{v}_n);(v_e+v_n)} \quad (14)$$

- je izpolnjen, ničelne domneve H_0 ne moremo zavriniti s tveganjem α ;
- ni izpolnjen, ničelno domnevo H_0 zavravimo in sprejmemo alternativno H_1 s tveganjem α .

Pri dveh popolnih preizkusih gre za število prostostnih stopenj $v_e + v_n = \tilde{v}_e + \tilde{v}_n = 56$. Kritična vrednost testne statistike ob tveganju $\alpha = 5\%$ znaša $F_{0,975;56;56} = 1,70$. Za 1. in 2. popolni preizkus lahko zgornji pogoj zapišemo kot:

$$0,59 \leq \frac{s_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-e,n}}^2} \leq 1,70. \quad (15)$$

V ustaljenem statističnem preizkušanju domnev postavimo ničelno in alternativno domnevo za variance:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_{e,n}^2 &= \tilde{\sigma}_{e,n}^2 \\ H_1: \sigma_{e,n}^2 &\neq \tilde{\sigma}_{e,n}^2 \end{aligned} \quad (13^*)$$

Izračunamo testno statistiko F po obrazcu: $F = \frac{S_{e,n}^2}{\tilde{S}_{e,n}^2}$. Določimo kritični vrednosti $F_{1-\alpha/2; (v_e+v_n); (\tilde{v}_e+\tilde{v}_n)}$ in $F_{\alpha/2; (v_e+v_n); (\tilde{v}_e+\tilde{v}_n)}$ (navadno je podana le vrednost $F_{1-\alpha/2; (v_e+v_n); (\tilde{v}_e+\tilde{v}_n)}$, drugo kritično vrednost določimo iz enačbe: $F_{\alpha/2; (v_e+v_n); (\tilde{v}_e+\tilde{v}_n)} = \frac{1}{F_{1-\alpha/2; (\tilde{v}_e+\tilde{v}_n); (v_e+v_n)}}$). Če testna statistika pade v kritično območje, ničelno domnevo zavrnamo in sprejmemo alternativno s tveganjem α . Če vrednost testne statistike ne pade v kritično območje, ničelne domneve ne moremo zavrniti s tveganjem α .

d) Ali standardna odklona dveh vzorcev $\sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}$ in $\tilde{\sigma}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}$, ki se nanašata na isto elipsoidno višino h in sta bila določena iz dveh popolnih preizkusov meritev, spadata v isto populacijo ob predpostavki, da imata vzorca enako število prostostnih stopenj (v_h in \tilde{v}_h)? V standardu izhajajo iz ničelne ter alternativne domneve:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_h &= \tilde{\sigma}_h \\ H_1: \sigma_h &\neq \tilde{\sigma}_h \end{aligned} \quad (16)$$

Če pogoj:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2; v_h; \tilde{v}_h}} \leq \frac{S_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2}{\tilde{S}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2} \leq F_{1-\alpha/2; \tilde{v}_h; v_h} \quad (17)$$

- je izpolnjen, ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti s tveganjem α ;
- ni izpolnjen, ničelno domnevo H_0 zavrnamo in sprejmemo alternativno H_1 s tveganjem α .

Če je tveganje $\alpha = 5\%$ ter število prostostnih stopenj $v_h = \tilde{v}_h = 28$ in če primerjamo meritve dveh neodvisnih popolnih preizkusov, je kritična vrednost $F_{0,975; 28; 28} = 2,13$. Pogoj zapišemo v obliki:

$$0,47 \leq \frac{S_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2}{\tilde{S}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2} \leq 2,13. \quad (18)$$

V ustaljenem statističnem preizkušanju domnev postavimo ničelno in alternativno domnevo za variance:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_h^2 &= \tilde{\sigma}_h^2 \\ H_1: \sigma_h^2 &\neq \tilde{\sigma}_h^2 \end{aligned} \quad (13^*)$$

Izračunamo testno statistiko F po obrazcu: $F = \frac{S_h^2}{\tilde{S}_h^2}$. Določimo kritični vrednosti $F_{1-\alpha/2; v_h; \tilde{v}_h}$ in

$F_{\alpha/2, v_h, \bar{v}_h}$. Če testna statistika pade v kritično območje, ničelno domnevo zavrnilo in sprejmemo alternativno s tveganjem α . Če vrednost testne statistike ne pade v kritično območje, ničelne domneve ne moremo zavrnilo s tveganjem α .

3 PRAKTIČNI PRIMER PREIZKUSA INSTRUMENTA GNSS

V nadaljevanju prikazujemo rezultate preizkusa instrumenta Topcon Hiper Pro. Za bazno postajo smo privzeli v omrežju SIGNAL določeno točko VRS. Z RTK-metodo pridobljene koordinate so bile določene kot povprečje petih zaporedno izvedenih meritev (5 epoh), ko je bila opravljena inicializacija (uspešno določena vrednost celih valov). Meritve z mobilnim sprejemnikom (roverjem) smo izvajali na točkah FGG2 (R2 na sliki 1) in FGG3 (R1 na sliki 1) na strehi stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Jamovi 2 v Ljubljani, med katerima smo z drugimi metodami (statična GNSS-izmera oz. izmera dolžine z elektronskim tahimetrom in določitev višinskih razlik s postopkom niveliranja) določili horizontalno dolžino ($D^*=22,503$ m) in višinsko razliko ($\Delta h^* = -0,025$ m). V preizkusu bomo izhajali iz podatkov o dosegljivi natančnosti, ki jih podaja proizvajalec (Topcon Hiper Pro, 2006): $\sigma_{Hz} = \sigma_{e,n} = 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot b$, $\sigma_{\Delta h} = 15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot b$, kjer je b oddaljenost točk R1 in R2 od baznega stojišča. Točki sta od najbližje permanentne postaje omrežja oddaljeni približno 4 km. Ker pa smo delali v načinu VRS, kjer je bazna postaja VRS oddaljena le nekaj deset metrov, je v nadaljevanju drugi člen izraza za $\sigma_{e,n}$ in $\sigma_{\Delta h}$ izpuščen.

3.1 Prvi popolni preizkus

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanj	
				[m]	[m]	[m]			[mm] $\varepsilon_{D_{i,j}}$	[mm] $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
	i	j	k	e	n	h				
1	1.	1.	FGG3	460947,561	100791,213	367,516				
2	1.	1.	FGG2	460938,086	100811,619	367,547	22,498	-0,031	5	6
3	1.	2.	FGG3	460947,560	100791,211	367,518				
4	1.	2.	FGG2	460938,085	100811,619	367,539	22,500	-0,021	3	-4
5	1.	3.	FGG3	460947,559	100791,209	367,515				
6	1.	3.	FGG2	460938,085	100811,619	367,537	22,502	-0,022	1	-3
7	1.	4.	FGG3	460947,559	100791,211	367,520				
8	1.	4.	FGG2	460938,087	100811,615	367,544	22,495	-0,024	8	-1
9	1.	5.	FGG3	460947,560	100791,210	367,518				
10	1.	5.	FGG2	460938,086	100811,619	367,544	22,501	-0,026	2	1
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								±	35	53

Preglednica 1: Preizkus 1 – 1. serija meritev (6. 1. 2010, začetek približno ob 8:30).

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanj	
				[m]					[mm]	[mm]
				e	n	h			$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
i	j	k	e	n	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$	
11	2.	1.	FGG3	460947,562	100791,213	367,516				
12	2.	1.	FGG2	460938,087	100811,620	367,547	22,499	-0,042	4	17
13	2.	2.	FGG3	460947,560	100791,214	367,518				
14	2.	2.	FGG2	460938,085	100811,620	367,539	22,498	-0,038	5	13
15	2.	3.	FGG3	460947,560	100791,210	367,515				
16	2.	3.	FGG2	460938,087	100811,619	367,537	22,500	-0,025	3	0
17	2.	4.	FGG3	460947,562	100791,215	367,520				
18	2.	4.	FGG2	460938,081	100811,618	367,544	22,498	-0,010	5	-15
19	2.	5.	FGG3	460947,564	100791,211	367,518				
20	2.	5.	FGG2	460938,084	100811,615	367,548	22,499	-0,034	4	9
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								\pm	35	53

Preglednica 2: Preizkus 1 – 2. serija meritev (6. 1. 2010, začetek približno ob 10:30).

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanj	
				[m]					[mm]	[mm]
				e	n	h			$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
i	j	k	e	n	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$	
21	3.	1.	FGG3	460947,563	100791,213	367,514				
22	3.	1.	FGG2	460938,082	100811,611	367,569	22,494	-0,055	9	30
23	3.	2.	FGG3	460947,561	100791,206	367,524				
24	3.	2.	FGG2	460938,084	100811,614	367,556	22,501	-0,032	2	7
25	3.	3.	FGG3	460947,562	100791,204	367,529				
26	3.	3.	FGG2	460938,086	100811,615	367,561	22,503	-0,032	0	7
27	3.	4.	FGG3	460947,562	100791,202	367,532				
28	3.	4.	FGG2	460938,085	100811,617	367,560	22,507	-0,028	-4	3
29	3.	5.	FGG3	460947,561	100791,201	367,527				
30	3.	5.	FGG2	460938,083	100811,617	367,546	22,509	-0,019	-6	-6
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								\pm	35	53

Preglednica 3: Preizkus 1 – 3. serija meritev (6. 1. 2010, začetek približno ob 12:30).

V preglednicah 1, 2 in 3 predstavljamo rezultate meritev prvega popolnega preizkusa na točkah FGG3 in FGG2 z instrumentom Topcon Hiper Pro.

Vsa opazovanja ustrezajo merilu (2) ($\varepsilon_{D_{FGG2, FGG3}}$ in $\varepsilon_{\Delta h_{FGG2, FGG3}}$), kar pomeni, da ni prisotnih grobo pogrešenih meritev (tj. z RTK-metodo pridobljenih koordinat e, n, h). Iz meritev določimo standardne odklone vzorcev za koordinate (e, n, h): $s_e = \pm 1,63$ mm, $s_n = \pm 3,59$ mm ter $s_h = \pm 9,24$ mm. Glede na izraze (6) izračunamo standardna odklona:

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} = \pm 3,95 \text{ mm} \quad \text{in} \quad s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} = \pm 9,24 \text{ mm}. \quad (19)$$

3.2 Drugi popolni preizkus

Z istim instrumentom smo naslednji dan ponovno opravili popolni preizkus. Da bi zagotovili čim bolj enake pogoje (predvsem geometrijo razporeditve satelitov), smo opazovanja opravili v podobnih časovnih intervalih kot prejšnji dan. Rezultate meritev predstavljamo v preglednicah 4, 5 in 6.

Vse meritve (koordinate) tudi tokrat ustrezajo merilu (2), kar pomeni, da ni prisotnih grobo pogrešenih meritev. Standardne odklone koordinat 2. popolnega preizkusa zaradi nadaljnjega statističnega preizkušanja domnev predstavljamo z oznakami $\tilde{s}_e = \pm 4,26$ mm, $\tilde{s}_n = \pm 1,90$ mm ter $\tilde{s}_h = \pm 9,90$ mm. Glede na izraze (6) lahko določimo standardna odklona drugega popolnega preizkusa:

$$\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} = \pm 4,66 \text{ mm} \quad \text{in} \quad \tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}h} = \pm 9,90 \text{ mm} \quad (20)$$

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanj	
				[m]					[mm]	[mm]
	i	j	k	e	n	h			$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
1	1.	1.	FGG3	460947,562	100791,213	367,522				
2	1.	1.	FGG2	460938,087	100811,620	367,564	22,499	-0,042	4	17
3	1.	2.	FGG3	460947,560	100791,214	367,513				
4	1.	2.	FGG2	460938,085	100811,620	367,551	22,498	-0,038	5	13
5	1.	3.	FGG3	460947,560	100791,210	367,524				
6	1.	3.	FGG2	460938,087	100811,619	367,549	22,500	-0,025	3	0
7	1.	4.	FGG3	460947,562	100791,215	367,514				
8	1.	4.	FGG2	460938,081	100811,618	367,524	22,498	-0,010	5	-15
9	1.	5.	FGG3	460947,564	100791,211	367,524				
10	1.	5.	FGG2	460938,084	100811,615	367,548	22,498	-0,034	4	9
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								±	35	53

Preglednica 4: Preizkus 2 – 1. serija meritev (7. 1. 2010, začetek približno ob 8:30).

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanja	
				[m]					[mm] $\varepsilon_{D_{i,j}}$	[mm] $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
				e	n	h				
i	j	k	e	n	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$	
11	2.	1.	FGG3	460947,563	100791,213	367,514				
12	2.	1.	FGG2	460938,082	100811,611	367,569	22,494	-0,055	9	30
13	2.	2.	FGG3	460947,561	100791,206	367,524				
14	2.	2.	FGG2	460938,084	100811,614	367,556	22,501	-0,032	2	7
15	2.	3.	FGG3	460947,562	100791,204	367,529				
16	2.	3.	FGG2	460938,086	100811,615	367,561	22,503	-0,032	0	-7
17	2.	4.	FGG3	460938,086	100791,202	367,532				
18	2.	4.	FGG2	460938,085	100811,617	367,560	22,507	-0,028	-4	3
19	2.	5.	FGG3	460947,561	100791,201	367,527				
20	2.	5.	FGG2	460938,083	100811,617	367,546	22,509	-0,019	-6	-6
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								\pm	35	53

Preglednica 5: Preizkus 2 – 2. serija meritev (7. 1. 2010, začetek približno ob 10:30).

Zap. št.	Serija	Niz	Točka $k=1$ (FGG3) $k=2$ (FGG2)	Koordinate			Hz. dolžina [m] $D_{i,j}$	Višinska razlika [m] $\Delta h_{i,j}$	Odstopanja	
				[m]					[mm] $\varepsilon_{D_{i,j}}$	[mm] $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
				e	n	h				
i	j	k	e	n	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$	
21	3.	1.	FGG3	460947,561	100791,204	367,523				
22	3.	1.	FGG2	460938,079	100811,611	367,560	22,502	-0,037	1	12
23	3.	2.	FGG3	460947,560	100791,199	367,525				
24	3.	2.	FGG2	460938,082	100811,612	367,572	22,506	-0,047	-3	22
25	3.	3.	FGG3	460947,562	100791,203	367,524				
26	3.	3.	FGG2	460938,082	100811,617	367,547	22,508	-0,023	-5	-2
27	3.	4.	FGG3	460947,560	100791,203	367,525				
28	3.	4.	FGG2	460938,086	100811,615	367,563	22,503	-0,038	0	13
29	3.	5.	FGG3	460947,561	100791,207	367,520				
30	3.	5.	FGG2	460938,081	100811,617	367,536	22,504	-0,016	-1	-9
meji dop. odstopanj: $\varepsilon_{D_{i,j}} / \varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$								\pm	35	53

Preglednica 6: Preizkus 2 – 3. serija meritev (7. 1. 2010, začetek približno ob 12:30).

3.3 Statistični testi

Statistična testa glede na vprašanji a) in b) (razdelek 2.3) delamo za oba celotna preizkusa posebej, medtem ko s statističnima testoma c) in d) v nadaljevanju primerjamo skladnost meritev 1. in 2. popolnega preizkusa.

3.3.1 Statistični test glede na vprašanje a)

Izhajamo iz ničelne domneve, da je iz vzorca opazovanj izračunani standardni odklon za horizontalni položaj (e , n) manjši ali enak vrednosti, ki jo podaja proizvajalec instrumenta Topcon Hiper Pro, to je $\sigma_{Hz} = \sigma_{e,n} = 10$ mm. Postavimo ničelno in alternativno domnevo (v skladu z navodili standarda):

$$H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} \leq 10 \text{ mm}$$

$$H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} > 10 \text{ mm}$$

Za 1. neodvisni popolni preizkus po navodilih standarda preverimo pogoj (9), kjer izhajamo iz vrednosti za $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}$, izračunane v (19):

$$s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} \leq 10 \text{ mm} \cdot 1,15$$

$$\mathbf{3,95 \text{ mm} \leq 11,5 \text{ mm}}$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrni.

Nadalje za 2. neodvisni popolni preizkus preverimo pogoj (9); tokrat izhajamo iz vrednosti za $\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}$, izračunane v (20):

$$\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} \leq 10 \text{ mm} \cdot 1,15$$

$$\mathbf{4,66 \text{ mm} \leq 11,5 \text{ mm}}$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrni.

Ugotovimo, da s tveganjem 5% ne moremo trditi, da je standardni odklon z RTK-metodo pridobljenih koordinat v horizontalni ravnini večji od vrednosti, ki jo podaja proizvajalec (10 mm) - velja za 1. in 2. popolni preizkus.

V statističnem preizkušanju domnev postavimo ničelno in alternativno domnevo, izračunamo testno statistiko H in jo primerjamo s kritično vrednostjo χ^2 . Domnevi sta enaki za 1. in 2. popolni preizkus:

$$H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2 = (10 \text{ mm})^2$$

$$H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2 > (10 \text{ mm})^2$$

$$1. \text{ popolni preizkus: } H = \frac{56 \cdot (3,95 \text{ mm})^2}{(10 \text{ mm})^2} = 8,74$$

$$2. \text{ popolni preizkus: } H = \frac{56 \cdot (4,66 \text{ mm})^2}{(10 \text{ mm})^2} = 12,16$$

$$\chi_{0,95;56}^2 = 74,47$$

Sklep: Testna statistika ne pade v kritično območje (H ni večja od χ^2), zato ničelne domneve ne moremo zavrniti (velja za 1. in 2. popolni preizkus).

Odgovor: Ugotovimo, da s tveganjem 5 % ne moremo trditi, da je standardni odklon z RTK-metodo pridobljenih koordinat v horizontalni ravnini večji od vrednosti, ki jo podaja proizvajalec - velja za 1. in 2. preizkus.

3.3.2 Statistični test glede na vprašanje b)

Izhajamo iz ničelne domneve, da je iz vzorca opazovanj izračunani standardni odklon $\sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}$ za elipsoidno višino h manjši ali enak vrednosti, ki jo podaja proizvajalec instrumenta Topcon Hiper Pro, to je $\sigma_h = 15 \text{ mm}$. Postavimo ničelno in alternativno domnevo:

$$H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq 15 \text{ mm}$$

$$H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} > 15 \text{ mm}$$

Za 1. popolni preizkus preverimo pogoj (12), kjer izhajamo iz vrednosti za $S_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}$, ki je izračunana v (19):

$$S_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq 15 \text{ mm} \cdot 1,22$$

$$\mathbf{9,24 \text{ mm} \leq 18,3 \text{ mm}}$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti.

Enako za 2. popolni preizkus preverimo pogoj (12), kjer izhajamo iz vrednosti za $\tilde{S}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}$, ki je predstavljena v (20):

$$\tilde{S}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq 15 \text{ mm} \cdot 1,22$$

$$\mathbf{9,90 \text{ mm} \leq 18,3 \text{ mm}}$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti.

S tveganjem 5 % ne moremo trditi, da je standardni odklon z RTK-metodo pridobljenih elipsoidnih višin iz 1. in 2. popolnega preizkusa večji od vrednosti, ki jo podaja proizvajalec (15 mm).

Postopek statističnega preizkušanja domnev - domnevi sta enaki za 1. in 2. popolni preizkus:

$$H_0: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2 = (15 \text{ mm})^2$$

$$H_1: \sigma_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2 > (15 \text{ mm})^2$$

$$1. \text{ popolni preizkus: } H = \frac{28 \cdot (9,24 \text{ mm})^2}{(15 \text{ mm})^2} = 10,62$$

$$2. \text{ popolni preizkus: } H = \frac{28 \cdot (9,90 \text{ mm})^2}{(15 \text{ mm})^2} = 12,20$$

$$\chi_{0,95;28}^2 = 41,34$$

Sklep: Testna statistika ne pade v kritično območje (H ni večja od χ^2), zato ničelne domneve ne moremo zavrniti (velja za 1. in 2. popolni preizkus).

Odgovor: Ugotovimo, da s tveganjem 5 % ne moremo trditi, da je standardni odklon z RTK-metodo pridobljenih elipsoidnih višin večji od vrednosti, ki jo podaja proizvajalec (15 mm) - velja za 1. in 2. popolni preizkus.

3.3.3 Statistični test glede na vprašanje c)

Ugotavljamo, ali horizontalni položaji, pridobljeni iz dveh neodvisnih vzorcev (to je meritve iz 1. popolnega preizkusa (6. 1. 2010) in 2. popolnega preizkusa (7. 1. 2010)), spadajo v isto populacijo, če predpostavljamo, da imata vzorca enako število prostostnih stopenj ($v_e + v_n = \tilde{v}_e + \tilde{v}_n = 56$). Standardna odklona sta navedena v (19) in (20): $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} = \pm 3,95 \text{ mm}$ in $\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n} = \pm 4,66 \text{ mm}$.

Izhajamo iz ničelne in alternativne domneve (13), to je:

$$H_0: \sigma_{e,n} = \tilde{\sigma}_{e,n}$$

$$H_1: \sigma_{e,n} \neq \tilde{\sigma}_{e,n}$$

Preverimo pogoj (15):

$$0,59 \leq \frac{s_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-}e,n}^2} \leq 1,70$$

$$0,59 \leq \frac{15,60}{21,72} \leq 1,70$$

$$0,59 \leq 0,72 \leq 1,70$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti.

S tveganjem 5 % ne moremo trditi, da položaji v horizontalni ravnini iz 1. in 2. popolnega preizkusa ne spadajo v isto populacijo.

V statističnem preizkušanju domnev postavimo ničelno in alternativno domnevo, izračunamo testno statistiko F in jo primerjamo s kritičnima vrednostma pri ($v_e + v_n$) in ($\tilde{v}_e + \tilde{v}_n$) prostostnih stopnjah.

$$H_0: \sigma_{e,n}^2 = \tilde{\sigma}_{e,n}^2$$

$$H_1: \sigma_{e,n}^2 \neq \tilde{\sigma}_{e,n}^2$$

$$F = \frac{s_{\tilde{e},n}^2}{s_{e,n}^2} = \frac{(3,95 \text{ mm})^2}{(4,66 \text{ mm})^2} = 0,72$$

$$F_{1-\alpha/2=0,975;v_e+v_n=56;\tilde{v}_e+\tilde{v}_n=56} = 1,70$$

$$F_{\alpha/2=0,025;v_e+v_n=56;\tilde{v}_e+\tilde{v}_n=56} = \frac{1}{F_{1-\alpha/2=0,975;v_e+v_n=56;\tilde{v}_e+\tilde{v}_n=56}} = 0,59$$

Sklep: Testna statistika ne pade v kritično območje (F je večja od $F_{0,025;56;56}$ in manjša od $F_{0,975;56;56}$), zato ničelne domneve ne moremo zavrniti.

Odgovor: S tveganjem 5 % ne moremo trditi, da položaji v horizontalni ravnini iz 1. in 2. popolnega preizkusa ne spadajo v isto populacijo.

3.3.4 Statistični test glede na vprašanje d)

Ugotavljamo, ali elipsoidne višine h , pridobljene iz dveh neodvisnih vzorcev (meritve iz 1. popolnega preizkusa (6. 1. 2010) in 2. popolnega preizkusa (7. 1. 2010)), spadajo v isto populacijo, če predpostavljamo, da imata vzorca enako število prostostnih stopenj ($v_h = \tilde{v}_h = 28$). Standardna odklona sta navedena v (19) in (20): $s_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} = \pm 9,24 \text{ mm}$ in $\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}} = \pm 9,90 \text{ mm}$.

Izhajamo iz ničelne ter alternativne domneve (16), to je:

$$H_0: \sigma_h = \tilde{\sigma}_h$$

$$H_1: \sigma_h \neq \tilde{\sigma}_h$$

Preverimo pogoj (18):

$$0,47 \leq \frac{s_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-GNSS-RTK-h}}^2} \leq 2,13$$

$$0,47 \leq \frac{85,38}{98,01} \leq 2,13$$

$$0,47 \leq 0,87 \leq 2,13$$

Sklep: pogoj je izpolnjen, zato ničelne domneve H_0 ne moremo zavrniti.

S tveganjem 5 % ne moremo trditi, da elipsoidne višine h iz 1. in 2. popolnega preizkusa ne spadajo v isto populacijo.

V statističnem preizkušanju domnev postavimo ničelno in alternativno domnevo, izračunamo testno statistiko F in jo primerjamo s kritičnima vrednostma pri v_h in \tilde{v}_h prostostnih stopnjah.

$$H_0: \sigma_h^2 = \tilde{\sigma}_h^2$$

$$H_1: \sigma_h^2 \neq \tilde{\sigma}_h^2$$

$$F = \frac{s_h^2}{\hat{s}_h^2} = \frac{(9,24 \text{ mm})^2}{(9,90 \text{ mm})^2} = 0,87$$

$$F_{1-\alpha/2=0,975;v_h=28;\hat{v}_h=28} = 2,13$$

$$F_{\alpha/2=0,025;v_h=28;\hat{v}_h=28} = \frac{1}{F_{1-\alpha/2=0,975;v_h=28;\hat{v}_h=28}} = 0,47$$

Sklep: Testna statistika ne pade v kritično območje (F je večja od $F_{0,025;28;28}$ in manjša od $F_{0,975;28;28}$), zato ničelne domneve ne moremo zavrniti.

Odgovor: S tveganjem 5 % ne moremo trditi, da elipsoidne višine iz 1. in 2. popolnega preizkusa ne spadajo v isto populacijo.

Iz statističnih testov za vprašanja a) in b) za dani primer ne moremo trditi (tveganje 5 %), da je standardni odklon horizontalnih položajev ter elipsoidnih višin, pridobljenih z RTK-metodo izmere, večji od predpisanih. Iz testov za vprašanja c) in d) pa s tveganjem 5 % ne moremo trditi, da 3D-koordinate, pridobljene z RTK-metodo izmere dvakrat neodvisno ter z istim instrumentom na istih točkah, ne spadajo v isto populacijo. Rezultate testov za vprašanja c) in d) lahko razložimo tudi drugače: za oba primera popolnega preizkusa lahko sklepamo, da so bile meritve opravljene v enakih pogojih za GNSS-opazovanja. Če so bili pogoji različni, pa lahko trdimo (tveganje 5 %), da so bili vplivi na GNSS-opazovanja v programskem paketu instrumenta Topcon Hiper Pro uspešno odstranjeni.

4 SKLEP

Preizkus GNSS-RTK instrumentov po standardu ISO 17123-8 uporabnika sicer ne omejuje glede načina izbire bazne postaje, čeprav je fizično postavljena (postavimo jo sami ali za to uporabimo javno permanentno postajo) vsaj v teoretičnem smislu boljša izbira. Predvsem zato, ker je bazna postaja med preizkusom vseskozi ista točka, pa tudi zato, ker so 3D-položaji določeni iz obdelave GNSS-opazovanj, ki so dejansko potekala na točkah. Težava se pojavi, kadar nimamo na voljo lastne bazne postaje in smo od permanentne postaje preveč oddaljeni, da bi lahko korektno opravili RTK-meritve.

Če izvajamo RTK-metodo izmere v načinu VRS, so položaji določeni iz dejansko opravljenih opazovanj le na eni točki (rover), za točko VRS pa so opazovanja računsko določena v centru omrežja permanentnih postaj. Ob tem se pojavi težava izvedbe RTK-izmere v načinu VRS - po izvedbi enega niza opazovanj se navadno izključimo iz omrežja permanentnih postaj in se čez 90 minut ponovno vključimo. To pomeni, da nam računski center v omrežju na novo vzpostavi točko VRS, ki ni na istem položaju kot v predhodno izvedenem nizu meritev. Poleg tega je model vplivov na opazovanja, ki je vključen v pripravo opazovanj VRS, po 90 minutah lahko precej drugačen kot ob predhodnih določitvah. Rešitev težave bi lahko bila dodatna zahteva po istočasni izvedbi kinematičnih opazovanj za naknadno obdelavo in nadaljnji primerjavi koordinat ene in druge metode (RTK in kinematična metoda z naknadno obdelavo).

Preizkus po navodilih standarda ISO 17123-8 je zastavljen tako, da najprej preverimo, ali je z določenim instrumentom mogoče doseči natančnost, ki jo podaja proizvajalec. Nadaljnja primerjava meritev na istem delovišču, vendar ob drugačnih pogojih, pa lahko kaže tudi na težavo neustrezno modeliranih vplivov na opazovanja v programskem paketu GNSS-instrumenta. Ob praktični izvedbi preizkusa smo si zastavili tudi vprašanja optimalne izvedbe preizkusa, in sicer: ali bi bilo smiselno za pridobitev posameznih rezultatov RTK-meritev določiti večje število zaporedno določenih 3D-položajev (število epoh), ali je dolžina serije opazovanj (približno 3 ure) optimalno določena glede na to, da so obhodni časi satelitov 12 zvezdnih ur, ali je dolžina niza opazovanj 20 minut dovolj dobra glede na odstranitev vpliva večpotja ter, ne nazadnje, ali smemo na podlagi standardnega odklona, pridobljenega z izvedbo enega preizkusa, ocenjevati kakovost instrumenta. Zadnje vprašanje je vezano tudi na izpopolnitev standarda, ki bo v razširjeni obliki najbrž moral vsebovati tudi periodo med zaporedno izvedenimi preizkusi. Nadaljnjo izpopolnitev standarda ISO 17123-8 vidimo v uskladitvi standarda s statističnimi postopki preizkušanja domnev ter podrobnejši opredelitvi izvedbe preizkusa. Nadgradnja standarda pa bo šla najbrž v smer preizkušanja integriranih merskih sistemov, to je merskega instrumenta, ki ga sestavlja GNSS-instrument, povezan z elektronskim tahimetrom.

Literatura in viri:

Drobne, S., Turk, G. (2002). Statistika, vaje. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana.

Heister, H. (2008). The new ISO standard 17123-8 for checking GNSS field measuring systems. FIG delovni teden 2008, Stockholm, Švedska.

Mednarodni standard ISO 17123-8 (2007). Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK), ISO 17123-8: 2007 (E).

Rothacher, M. (2001). Kombination absoluter und relativer Antennenkalibrierungen. Proceedings 3. GPS-Antenne-Workshop 2001, Geodätisches Institut Bonn.

Topcon Hiper Pro (2006). Operators' manual. Topcon Positioning Systems, Inc.

Prispelo v objavo: 27. september 2010

Sprejeto: 24. november 2010

asist. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: polona.pavlovcic@fgg.uni-lj.si

Albin Mencin

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: albin.mencin@fgg.uni-lj.si

izr. prof. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si