

## Določanje položaja z enofrekvenčnim sprejemnikom GPS na podlagi kode C/A signala za potrebe arheo-geofizikalnih preiskav

Franc Dimc<sup>1</sup>, Branko Mušič<sup>2</sup>, Radko Osredkar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet, Portorož

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Oddelek za arheologijo, Ljubljana

<sup>3</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Ljubljana

E-pošta: franc.dimc@fpp.uni-lj.si

**Povzetek.** Arheologi potrebujejo na preprost način izmerjene, toda natančne podatke o arheološkem potencialu preiskovanega terena. Rezultati geofizikalnih meritev znatno pridobijo na vrednosti, če je za potrebe obdelave podatkov natančno poznan položaj mesta na najdišču, kjer so bili izmerjeni. Sprejemnik GPS ustrezno sproti določa položaj, če dosega zahtevano natančnost. Nanjo odločilno vplivajo pogoji meritve in v tem prispevku analiziramo, v kakšnih poslabšanih pogojih, ki so na arheološkem terenu skorajda pravilo, enofrekvenčni sprejemnik iz dobljenih satelitskih signalov še lahko doseže zahtevano negotovost določitve položaja svoje antene. Terenske izkušnje geofizikov narekujejo negotovost 40 cm, ki so jo naši rezultati poskusnih meritev tudi dosegali.

**Ključne besede:** GPS, arheo-geofizika, merilna negotovost

## Positioning with a single-frequency GPS receiver on the basis of the signal C/A code for the needs of field archeo-geophysical surveying

**Extended abstract.** Geophysical measurements made for the needs of extensive surveys at archaeologically unexplored sites usually performed according to general terrestrial geodetic procedures can be efficiently aided by satellite navigation methods. The reason for applying inexpensive, single-frequency (L1) global positioning systems (GPS) in geophysical surveying needed for extensive archaeological activities is their simple use and the need of flexibility and effectiveness of such work.

A sufficient degree of flexibility can only be assured by a complete autonomy of the team in planning and executing the field work through positioning of identified anomalous areas. The currently available geophysical instruments allow for detection of changes in local soil conductivity, deviations of the vertical component of the magnetic field density gradient and besides detection beneath surface structure boundaries also their visualization with different microwave reflection or absorption coefficients. Archeological remains can be distinguished from the other detected objects by further data matching.

The probability of the certainty interval in testing methods made with the L1 GPS receivers is claimed to be 95%. Uncertainty of the test results was determined

with Equation 1. Tests of various types made with the inexpensive GPS receivers enabled assessment of the techniques used in archeo-geophysical surveying. The data obtained from GPS results (Table 1) agree with reference measurements made in accordance with pedestrian navigation demands. In case of degradation of the GPS fixes during scanning, errors are compensated and results refined through post-processing of the measurement data. The main advantage of the test sites, compared to the archaeological sites, is their availability while factors of obscuration and multipath are present in both sites. Sufficient duration of static observation was determined and assessed (Figure 1). A systematical error occurred in static observations in the presence of a multipath and when DGPS was not utilized (Figure 2). To synchronize various positioning devices used in kinematical observations, a matching algorithm incorporating typical delay times is needed (Table 2). It is demonstrated that under favorable conditions a 40 cm relative uncertainty of the kinematical positioning is achievable (Table 3). Occurrence of "random walk" time pattern of deviations was observed during kinematic experiments as shown in Figure 3.

**Key words:** GPS, archeology, geophysical surveying, measurement uncertainty

## 1 Uvod

Z magnetometri pri arheološki prospekciji merimo spremembe zemeljskega magnetnega polja, ki jih je na terenu pustila človeška dejavnost. V arheološki praksi se je najbolj uveljavil pretočni gradiometer britanskega proizvajalca Geoscan Research (*Fluxgate Gradiometer FM36*), ki meri gradient navpične komponente gostote magnetnega pretoka, boljše razločljivost (manj od 0,5 nT) pa zagotavljajo novejši protonski magnetometri (npr.: Overhauser GEM19). Na Oddelku za arheologijo, UL z magnetometrom Geometrics G-858 dosežemo ločljivost 0,1-0,2 nT pri hitrosti odčitavanja 0,2 s. To je največ, kar trenutno ponuja trg komercialnih magnetometrov.

Geoelektrična upornostna metoda, ki se je podobno uspešno kot magnetna uveljavila v arheologiji, temelji na električnem polju, ki ga pod površjem vzpostavimo s parom tokovnih elektrod zapičenim v površino, na elektrode pa je priključen galvanski člen (1mA, 40-100 V). S parom potencialnih elektrod spremljamo spremembe napetosti, ki jo ob poznavanju toka pretvorimo v navidezno upornost določene prostornine tal. V arheologiji se je izkazala za najučinkovitejšo elektrodna razvrstitev, ki jo imenujemo »twin probes« po dveh parih elektrod, kjer je en par tokovne in potencialne elektrode tako rekoč neskončno daleč od drugega enakega para. To metodo uporabljamo za geoelektrično kartiranje. Najbolj znan instrument, ki deluje po tem principu, je Geoscan RM15, ki je izdelek britanske firme Geoscan Research. Ta instrument uporabljamo tudi na Oddelku za arheologijo.

Z georadarjem (*GPR-Ground Penetrating Radar, SIR-Subsurface Interface Radar*) prek oddajne antene, usmerjene v tla, pošiljamo sunke elektromagnetne energije in s sprejemno anteno registriramo čase in amplitude povratnih valov. Na georadarskih 2D profilih zlahka prepoznavamo predvsem arheološke arhitekturne ostaline. Največji prispevek georadarske metode k arheološki prospekciji pa je možnost 3D prikazovanja radarskih odbojev in s tem arhitekturnih ostalin. Na Oddelku za arheologijo uporabljamo opremo ameriškega proizvajalca z najdaljšo tradicijo na tem področju: GSSI Ltd., lahko bi pa tudi katero drugo, ker so tukaj razlike med instrumenti glede na zahteve našega področja dela minimalne.

V začetni fazi prospekcije na terenu s katero koli od omenjenih metod operater praviloma zajema podatke vzdolž zveznic med referenčnimi točkami. Obdelava rezultatov različnih geofizikalnih metod (»multi-method approach«) praviloma daje zelo natančen vpogled v arheološki potencial nekega območja. Nepravilnosti terena vzdolž zveznic (kotanje, kamni, rastje, vidnost oznak) omejujejo uporabo seštevnih navigacijskih metod: sledenje taktu (ob pisku instrumenta mora operater na primer doseči določeno razdaljo) ali merjenje dolžine prehojene poti, ne dajeta zanesljivega položaja zajema geofizikalnih podatkov. Točnost

zaključkov prospekcije pa je omejena z določitvami položaja geofizikalnih instrumentov med akvizicijo. Številne terenske izkušnje kažejo, da je še spremenljiva natančnost odčitkov v vodoravni ravnini 40 cm. To pa je natančnost, ki je v določenih okoliščinah in pri premišljenih postopkih zbiranja podatkov dosegljiva z metodo GPS. Ustrezen GPS sprejemnik s podatki o pozicioniranju, ki jih daje, je zato lahko v arheologiji dragoceno dopolnilo k drugi geoprospekcijski opre. Sprejemnik GPS je elektronska naprava, ki iz navigacijskih signalov satelitov in iz nadzornih središč na Zemlji sproti izračunava svoj položaj na površju Zemlje. Takšno izračunavanje v osnovi pomeni reševanje sistema nelinearnih enačb s štirimi neznankami: tri neznanke so koordinate, ki določajo položaj sprejemnika, četrta je čas. Za natančno določanje položaja uporabljamo sprejemnik (glej poglavje 2) zgolj kot beležnico odčitkov, namenjenih poznejši obdelavi z dodatnimi programskimi orodji. Rezultate opazovanj položaja s sprejemnikom GPS umeščamo v lokalno mrežo z geodetskimi postopki navezave na terestrični koordinatni sistem ITRS [1]. Z meritvami poskušamo ugotoviti ustreznost uporabe enofrekvenčnega sprejemnika, ne le zaradi pričakovane dovolj majhne negotovosti, ampak tudi zato, ker ga zaradi majhnosti z anteno vred precej lažje pritrdimo na ohišja geofizikalnih instrumentov kot dvofrekvenčnega.

## 2 Omejena uporabnost enofrekvenčnih sprejemnikov GPS

Kode GPS so binarni signali satelita GPS, ki jih sprejemnik izrablja za sinhronizacijo svoje ure z med seboj sinhroniziranimi satelitskimi urami in določanje psevdorazdalj. Ker signal kode v disperzivni ionosferi moti skupinska zakasnitev (*group delay*), nosilni signal sam pa fazna, sprejemnik iz obdelave zakasnitev obeh signalov oceni (*integer ambiguity*) psevdorazdalje do posameznega satelita. Iz same kode in navezave na geodetsko mrežo določa svoje koordinate z metrsko natančnostjo, z nadaljnjo obdelavo faze nosilnega signala pa natančnost določitve preide v decimetrski razred. Poznejše upoštevanje dejanskih efemerid satelitov v času opazovanja izračun položaja privede v podcentimetrsko natančnost [2]. Obdelava signalov in doseganje poddecimetrskosti natančnosti v realnem času uspeva le dvofrekvenčnim sprejemnikom, ki že v oceni psevdorazdalj ([3], str. 506) izločajo vplive večine motenj ([3] str. 454).

Pomembna kriterija za objektivno presojo okoliščin določanja položaja med opazovanjem sta spremenljivki NSV in DOP. Sprejemnik ju sam določi iz števila in vidnosti (azimut, elevacija) zaznanih satelitov. Spremenljivka NSV podaja število satelitov, ki jih sprejemnik zaznava dovolj visoko nad nivojem šuma in nad fizičnim obzorjem. Spremenljivka DOP številsko izraža vpliv trenutne razporeditve satelitov nad

obzorjem ravnine sprejemnikove antene na negotovost določanja položaja. Manjšo negotovost in z njo natančnejše meritve zagotavljata velik NSV in majhen DOP. HDOP je mera za določanje negotovosti koordinat v ravnini, tangencialni na površino (horizontalni), VDOP pa za določanje negotovosti v pravokotnici na površino. Negotovost določanja tretje komponente položaja (višine) z enako natančnostjo kot negotovost določanja preostalih dveh je večja, saj je relativna razpostavljenost satelitov glede na sprejemnik v vodoravni ravnini večja kot v navpični, zato je HDOP ponavadi manjši od VDOP.

V našem primeru za negotovost položaja jemljemo eksperimentalni standardni odmik odčitkov v vodoravni ravnini, pomnožen s HDOP (povzeto po [4], str. 74):

$$\sigma_{\text{položaj}} = HDOP \sigma_{\text{odčitkov}} \quad (1)$$

Diferencialni postopek meritve v primerjavi z avtonomnim postopkom zmanjšuje negotovost določanja psevdorazdalj, če sprejemnik na neznanem položaju in referenčna postaja na (z najmanjšo negotovostjo) znanem, vidita sočasno iste satelite. Postopek odpravlja vplive zamika satelitskih ur, napačno sporočenih efemerid glede na dejanski položaj satelitov, sončevega sevanja, pravzaprav vseh pojavov, ki so v obeh sprejemnikih dobro korelirani ([4], str. 226). Čim bolj sta si sprejemnika med seboj podobna (podobnost pomeni podobnost metod za sinhronizacijo, filtriranje, modeliranje ionosfere), tem več pojavov je koreliranih in v postopku obdelave izločenih. Sprejemnik referenčne postaje je na znanem in na koordinatni sistem ITRS navezanem položaju na površini Zemlje ali nad njo (satelit). Po radijskih zvezah ali omrežju mobilne telefonije oddaja svoje 'videnje' odstopanj od pravih vrednosti. Premični sprejemnik popravke upošteva v realnem času, če so sestavljeni po standardu RTCM.

Enofrekvenčni sprejemnik se pri obdelavi signalov od vseh motenj najteže prilagodi nenadnim spremembam TEC (*total electron content*) v ionosferi, še posebno če uporabljamo en sam sprejemnik (avtonomni postopek). Časovna spremenljivost pogojev v atmosferi zato najbolj vpliva na določitev merilne negotovosti položaja. Motnje ionosfere inducirajo spremembe gostote magnetnega pretoka zemeljskega magnetnega polja  $B_{\text{geo}}$ . Zemeljske opazovalnice spremembe ves čas spremljajo in proučujejo [5] ter preračunavajo v lokalni geomagnetni indeks  $K$  z vrednostmi od 0 do 9. Preračun iz spremenljivosti  $B_{\text{geo}}$ , izmerjene v izbranih opazovalnicah, v skupni (planetarni) indeks  $K_p$  [6], poteka po posebej dogovorjenem postopku.

Če izvajamo avtonomni postopek v času t.i. ionosferskih ali geomagnetnih neviht ( $K_p > 6$ ), opazimo, da se model ionosfere v sprejemnikovem računalniku prepočasno prilagaja spremembam ionosfere. Podatki o stanju celotne ionosfere se v sprejemniku osvežujejo na vsakih 12, 5 min [4]. Opisane motnje delovanja GPS so

zanimive [7]. Meritev z magnetometrom med geomagnetnimi nevihtami ni smiselna, za občutljiv instrument je lahko celo usodna. Merilno negotovost povečujejo tudi drugi vplivi.

Za majhne negotovosti med akvizicijo prospekcijskih podatkov morajo biti tako imenovana večpotja satelitskih signalov in zastiranja satelitov čim manjša. Večpotje (*multipath*) je pri določanju psevdorazdalje resna težava, ker ga je težko modelirati ([3], str. 457). Nastane zaradi več poti, po katerih se lahko signal enega satelita širi do antene sprejemnika. Zastrtost v naravi lahko nastane celo zaradi ozelenitve dreves [8]. Ob poznavanju lastnosti terena, njegovega obzorja, položaja višjih okoliških zgradb, lahko ocenimo, ali bomo med opazovanjem imeli težave z večpotjem in zastrtostjo ali ne. Zastrtost je pojav urbanih središč in sotesk, večpotju pa se ne moremo izogniti niti sredi oceana.

V pogojih zastrtosti satelitov si pri določanju položaja lahko pomagamo s posebnimi algoritmi [9]. V časih razburkane ionosfere pa določanje položaja olajša dodaten senzor, katerega odčitki so usklajeni z odčitki sprejemnika GPS. Dobro izbrana senzorja sta med seboj komplementarna: ko onemi sprejemnik GPS, s pomočjo krmilnega sistema z vstavljenim modelom gibanja, vsakoči sproti umerjani drugi senzor (pospeškometer, magnetometer ali žirokompas [10]). Za navigacijo pri hoji ob črti zadošča natančnost smeri  $1^\circ$  (*precision*) [11]. Z dodatnim senzorjem in krmilno elektroniko lahko odčitke GPS, pridobljene v slabih razmerah, tudi kompenziramo [12].

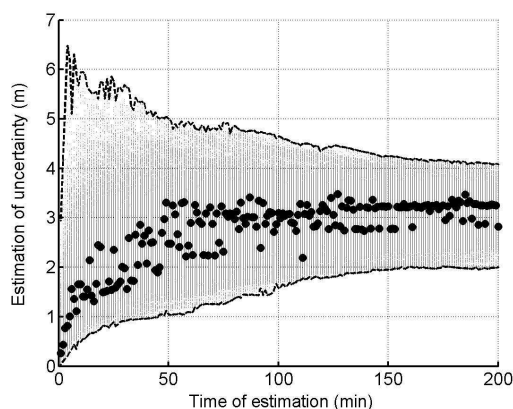
### 3 Rezultati preizkusa ustreznosti

Pri svojih meritvah ustreznosti metode GPS za geoprospekcijske namene smo uporabili sprejemnik GPS Allstar (OEM3, 12 kanalov, BAE systems/CMC/NovaTel) s frekvencama podajanja odčitkov 1 Hz ali 5 Hz, z anteno Aero AT 575-70, (dobitek 26 dB, delno usmerjena antena v obliki krpice (*patch*), ki z dobitkom sprejemniku predaja signale, sprejete nekaj stopinj nad obzorjem). Referenčna postaja, s katere smo dobivali popravke RTCM, od mesta opazovanja ni bila nikoli oddaljena več kot 20 km. Popravke smo sprejemali prek modema GSM (Fastrack M1206B-on, Wavecom). Orodje za analizo odčitkov smo zasnovali sami v okolju MATLAB. Podatke za poznejšo obdelavo faze smo imeli na voljo, programa pa ne. Daljša statična opazovanja smo opravili na satelitom deloma zastrtem stojišču (SS1). Kinematična opazovanja položaja smo opravili na različnih terenih, v osnovnih značilnostih, podobnih arheološkimi najdiščem. Preizkusni tereni so bili predvsem laže dostopni kot arheološki. Na prvem terenu (KS1) je bila antena sprejemnika GPS izpostavljena večpotju, drugi teren (KS2) pa je bil na povsem odprtem prostoru.

Transformiramo, z geodetskimi instrumenti na terenu z avtonomnim postopkom izmerjenega položaja točke, smo privzeli kot dogovorjeno pravo vrednost (referenčno vrednost), ne vključujoč sistematski pogrešek ETRS89 glede na WGS84. V kartezijski sistem transformiramo in izračunamo oddaljenosti od referenčne vrednosti (točke ali črte) vsakega odčitka posebej. Statistiko delamo z negotovostmi, ne zgolj z odstopanji od dogovorjene prave vrednosti.

Ustreznost negotovosti opazovanj preverjamo: statično z odstopanjem od referenčne točke in kinematično z odstopanjem zabeležene smeri od referenčne smeri, z odstopanjem odčitkov od referenčne smeri in z dolžino zabeležene poti.

V rezultatih smo opazili zanimive podrobnosti, ki jih navajamo v pod poglavjih.



Slika 1: Iz dvodnevni opazovanj smo določili, da prekratko statično opazovanje daje napačno oceno negotovosti (teren SS1)

Figure 1. Wrong uncertainty estimation of static observation caused by short times of observation as taken from the two days observations.

### 3.1 Nemirnost ionosfere

Kazalec (mera) nemirnosti ionosfere je vzorec odčitkov statičnega opazovanja: ob mirni ionosferi se odčitki spreminjajo zgolj po en razloček vzdolž osi  $\phi$  ali  $\lambda$ , v času neviht postanejo neposredni prehodi po diagonali med stičišči mreže tem bolj verjetni, čim bolj se povečuje aktivnost ionosfere oziroma lokalni indeks K.

### 3.2 Smer hoje

V postopku transformacije odčitkov iz globalnega terestričnega sistema v lokalni kartezijski sistem včasih nismo imeli geodetskih izmer točk na terenu podanih s centimetrsko negotovostjo. V teh primerih smo si pomagali z metrom in digitalnim kompasom ali, ob pričakovani večji (absolutni) negotovosti, z izračunom srednje vrednosti odčitkov statičnega opazovanja in transformacijo v lokalni sistem. Opažamo odstopanje (sistematski pogrešek?) smeri zabeleženih hoj  $\Psi_{\text{smeri}}$  od

referenčne smeri  $\Psi_{\text{kompas}}$ . Z GPS metodo določen kot  $\Psi_{\text{smeri}}$  je praviloma (glej tabelo 1) manjši od  $\Psi_{\text{kompas}}$ .

teren	število hoj	$\Psi_{\text{kompas}} (^{\circ})$	$\Psi_{\text{smeri}} (^{\circ})$
KS1	110	$88 \pm 1$	$87,3 \pm 2,0$
KS1	55	$88 \pm 1$	$87,7 \pm 1,1$
KS1	77	$5,5 \pm 0,3$	$3,6 \pm 1,6$
KS2	11	$88 \pm 1$	$86,7 \pm 0,8$
KS2	11	$-47 \pm 1$	$-49,0 \pm 0,5$
KS2	149	$42,1 \pm 0,3$	$40,4 \pm 0,6$
KS2	52	$33,3 \pm 0,4$	$32,3 \pm 0,9$

Tabela 1: Smeri hoj z upoštevanje deklinacije, določene s kompasom in z metodo GPS

Table 1. Directions of walks with the inherited declination as measured by the compass and GPS method.

### 3.3 Vpliv hitrosti gibanja na odstopanje

Hitrejše gibanje daje manjša odstopanja zaradi 'tovarniške nastavitve' Kalmanovega filtra ([3], str. 558). Filter potrebuje več odčitkov, da lahko iz (zaradi hoje) počasi spreminjajočih se vrednosti odčitkov zanesljivo oceni vzorec gibanja, in popravi izračune.

### 3.4 Čas opazovanja in negotovost

S statistiko dvodnevni opazovanj (slika 1) smo ocenjevali najkrajši čas statičnega opazovanja, v katerem lahko dovolj zanesljivo določimo negotovost. Negotovost podcenimo, če opazovanje traja premalo časa. V večpotju smo po 80 minutah s precej veliko verjetnostjo določili negotovost 3,0 m. Po 48 urah določena negotovost položaja znaša 3,16 m.

teren	štev. hoj	$tm_{0m}$ (s)	$tm_{2m}$ (s)
KS1, 1 Hz	110	$2 \pm 1$	$5 \pm 1$
KS1, 5 Hz	55	$3,0 \pm 1,6$	$6,0 \pm 2,0$
KS1, 5 Hz	77	$2,4 \pm 0,8$	$5,0 \pm 0,8$
KS2, 5 Hz	11	$2,6 \pm 0,4$	$5,2 \pm 0,6$
KS2, 5 Hz	11	$2,2 \pm 0,6$	$4,6 \pm 0,8$
KS2, 5 Hz	136	$2,0 \pm 0,6$	$4,4 \pm 1,2$
KS2, 5 Hz	52	$1,8 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,6$

Tabela 2: Statistika mrtvih časov

Table 2. Statistics of start delays.

### 3.5 Mrtvi čas zapisa hoje

Z meritvami časa hoje smo določili mrtvi čas meritve  $tm_{0m}$  (tabela 2) in  $tm_{2m}$  potreben čas, da se odčitek premakne za 2 m. Zaradi izmerjenega časa  $tm_{0m}$  pri merjenju ostajajo vprašanja: kje je bila antena ob določenem času v resnici, ali je sprejemnik po izteku časa meritve res miroval in ali so se odčitki v času hoje spreminjali za mrtvi čas manj, kot se je gibala antena. V dobrih razmerah se odčitki ob izteku časa gibanja res umirijo. Dileme lahko razrešijo rezultati, ki jih daje dodatni senzor gibanja.

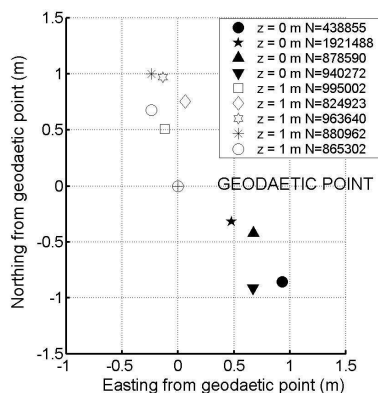
### 3.6 Dolžine hoj

Dolžine hoj ocenjujemo kot dolžino, izračunano iz odčitkov. Primerjamo oceni, izračunani iz **povprečja vsote odsekov med odčitki ene hoje in razdalje med skrajnima odčitkoma**. Včasih glede na izmerjeno dolžino poti nastanejo znatna odstopanja med ocenama, čeprav se statistični porazdelitvi ocen prekrivata. Ocena dolžine je na splošno bolj podobna referenčni dolžini in boljše obnovljivost rezultatov [13] dosegamo, če za dolžino vzamemo povprečje izračunanih ocen, razliko med ocenama pa vzamemo kot kriterij spremenljivosti ionosfere v času opazovanja. Ostaja nerazčiščeno vprašanje, ali je lokalni indeks K najbližje opazovalnice res povezan z razliko obeh ocen. Negotovost v različnih okoliščinah ionosferskih motenj vodi v boljše ali slabšo obnovljivost merilnih rezultatov. Z izločitvijo osamelcev s pomočjo mediane [14] so si srednje vrednosti ocen dolžine poti in razdalje med referenčnimi točkami glede na osnovno zahtevo terenskih geofizikov, dovolj blizu.

## 4 Rezultati

### 4.1 Statično določanje položaja

Dvodnevno opazovanje na prvi pogled kaže veliko negotovost položaja (1,8 m), toda srednje vrednosti rezultatov vsake meritve kljub večpotju ležijo raztresene v dovolj majhnih območjih (glej sliko 2), da srednje vrednosti, dobljene s statičnim opazovanjem, ustrezajo zahtevam po majhni relativni negotovosti. Glavni delež k sistematskemu pogrešku položaja, opaženega v poskusih, je pričakovano rezultat večpotja.



Slika 2: Določanje sistematskega pogreška položaja antene na dveh višinah, ko imamo na pretek časa za statično opazovanje (teren SS1)

Figure 2. A systematic antenna position error evaluation at two heights in the case of having enough time for static observation (site SS1).

Sistematski pogrešek (slika 2): geodetska točka je transformirana glede na ETRS89, rezultati meritev pa glede na WGS84. Nastaja odstopanje zaradi razlik med

ETRS89 in WGS84. ITRS in ETRS89 se med seboj ujemata v epohi 1989.0. Leta 1989 sta bili izhodišči WGS84 in ETRS89 oddaljeni za dogovorjeno vrednost, do določitve ETRS89 epoha 2002, sta se izhodišči sistemov razmaknili za dodatnih 25 cm. Dvig za 1 m povzroči sistematski pogrešek tudi zaradi drugačnega večpotja.

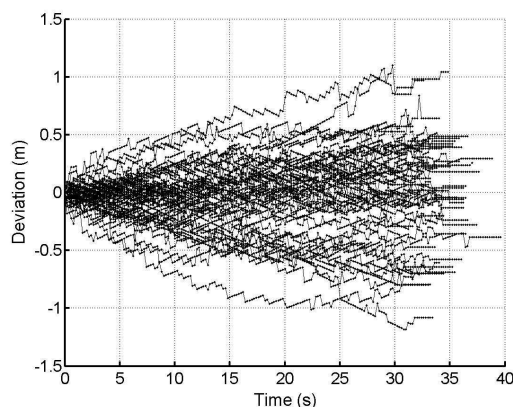
### 4.2 Kinematično določanje položaja

Po skupaj prehojenih 15,5 km poti vzdolž referenčnih črt, dolgih od 30 do 42 m sklepamo (tabela 3), da so rezultati negotovosti v nadzorovanih pogojih na meji ustreznosti. Zelo pomembna za ocenitev območja negotovosti je določitev referenčnih črt, saj upoštevanje kota referenčne smeri  $\psi_{\text{smeri}}$  namesto  $\psi_{\text{kompas}}$  (tabela 1) prinese zmanjšanje negotovosti odstopanj za vsaj 10 cm.

teren	odčitkov	95% rezultatov(m)	negotovost (m)
KS1	4150	1,67	0,96
KS1	10857	1,31	0,76
KS1	14909	1,07	0,62
KS1	2024	0,39	0,22
KS2	1908	0,35	0,20
KS2	21710	0,34	0,20
KS2	5054	0,38	0,22
*KS2	2094	1,04	0,60
KS2	2024	0,61	0,35
KS2	9285	0,54	0,31

Tabela 3: Statistika odstopanja od zveznic med referenčnimi točkami

Table 3 Deviations from the reference points connecting lines



Slika 3: Časovna odvisnost relativnega odstopanja od referenčne črte zabeleženega niza hoj v enem opazovanju (teren KS2)

Figure 3. Time dependence of the relative deviation from the reference line in one kinematical observation (site KS2)

Za referenčne točke nismo imeli geodetskih izmer, zato smo položaje določili z uporabljanim sprejemnikom in povprečili rezultat. \*Ne znamo razložiti vzroka slabših rezultatov: nenevihtna ionosfera in uporaba DGPS bi morali dati vsaj podobne rezultate kot v preostalih dveh

opazovanjih istega dne. V rezultatih stalne lokalne referenčne postaje v času opazovanja nismo opazili posebnosti.

Za časovni potek odstopanja je v fiziki uveljavljen izraz "random walk" (slika 3). Z določitvijo parametrov krivulje vsaki hoji posebej bi morda lahko rezultatom hoi vzdolž premice v realnem času kompenzirali odstopanja.

## 5 Mogoče izboljšave

Glede na predstavljene rezultate se zdi potrebno, da bi določanje položaja instrumentov med geofizikalnimi pregledi z enofrekvenčnim sprejemnikom GPS še izboljšali. Eno možnost izboljšanja ponuja s preizkusi določen model gibanja, ki združuje rezultate enofrekvenčnega sprejemnika GPS in pospeškometra [15]. Predvidevamo uporabo programskega kompenzatorja odstopanj. Uveljavljeni vzorec pregledovanja terena že predpostavlja zadostno ustavljanje na referenčnih točkah.

Za referenčne rezultate nameravamo uporabiti tudi dva enofrekvenčna sprejemnika. Rezultate premikajočega se sprejemnika bomo pozneje obdelali s programom za obdelavo faze.

Določitev sistematskega pogreška prepuščamo geodetskim postopkom. Nakazali smo vpliv sprememb TEC na določanje položaja in vpenjanje rezultatov opazovanj v geodetsko mrežo. Z nadaljnjim delom nameravamo omenjeni dejavnosti poglobiti.

## 6 Literatura

- [1] Stopar B., Kuhar M., *Moderni geodetski koordinatni sistemi in astrogeodetska mreža Slovenije*, Geodetski vestnik, zvezek 1, št. 45, str. 19, 2001.
  - [2] *Navodilo za izvajanje izmere z uporabo globalnih navigacijskih sistemov v državnem koordinatnem sistemu*, različica 2.0, Geodetski institut, Ljubljana, 2006.
  - [3] Strang G., Borre K., *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*, Wellesley-Cambridge Press, 1997.
  - [4] Van Sickle J., *GPS for Land Surveyors*, Taylor and Francis, New York, str. 74, 2001.
  - [5] Mihajlović S. J., *Morfologija varijacija geomagnetskega polja registrovanih na geomagnetski opservatoriji Grocka u periodu 1958 -1990 godine*, Geomagnetski institut Grocka, Beograd, 1996.
  - [6] Odijk D., *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*, PhD thesis, Delft University, 2002.
  - [7] Van Dierendonck A. J., Klobuchar J., Hua Q., *Ionospheric scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers*, izvlečki rezultatov študij po pogodbah z US Air Force št. F19628-92-C-0139, faza I, in št. F19628-93-C-0065, faza II., dostopno na medomrežju: <http://novatel.com/Documents/Papers/File13.pdf>
  - [8] Lachapelle G., Henriksen J., Melgaard T., *Seasonal Effect of Tree Foliage on GPS Signal Availability and Multipath for Vehicular Navigation*. Proceedings of GPS-94 (Salt Lake City, September 21-23), The Institute of Navigation, Alexandria, ZDA, str. 527-532, 1994.
  - [9] Saab S. S., Kassas Z. M., *Power Matching Approach for GPS Coverage Extension*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, zvezek 7, št. 2, str. 156-166, 2006.
  - [10] Sagawa K., Susumago M., Inooka H., *Unrestricted Measurement Method of Three-dimensional Walking Distance Utilizing Body Acceleration and Terrestrial Magnetism*, International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, Koreja, str. 707-710, 2001.
  - [11] Ladetto Q., Gabaglio V., Merminod B., *Two Different Approaches for Augmented GPS Pedestrian Navigation*, International Symposium on Location Based Services for Cellular Users, Locellus, Muenchen, 2001.
  - [12] Cho S. Y., Park C. G., *MEMS based Pedestrian Navigation System*, The Journal of Navigation, The Royal Institute of Navigation, zvezek 59, št. 1, str. 135 – 153, 2006.
  - [13] *Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja*, USM, Ljubljana, str. 38, 1999.
  - [14] Drnovšek J., Bojkovski J., Geršak G., Pušnik I., *Metrologija*, študijska skripta, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, str. 132, 2004.
  - [15] Gabaglio V., *Centralised Kalman Filter for Augmented GPS pedestrian navigation*, Institute of Navigation GPS, Salt Lake City, str. 312 – 318, 2001.
- Franc Dimc** je diplomiral leta 1993 in magistriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Ima izkušnje z raziskovalnega področja merjenja magnetnih veličin ter nabira izkušnje na področju uporabnosti preprostih radionavigacijskih in inercialnih naprav za beleženje počasnih gibanj.
- Branko Mušič** je diplomiral in magistriral na Oddelku za geologijo na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo Univerze v Ljubljani, doktoriral pa iz georheoloških vsebin na Oddelku za arheologijo na Filozofski fakulteti. Kot raziskovalec se ukvarja z geofizikalnimi raziskavami arheoloških najdišč in sodeluje pri številnih mednarodnih raziskovalnih projektih. Na Oddelku za arheologijo od leta 1997 predava geološke vsebine v okviru predmeta Naravoslovje.
- Radko Osredkar** je diplomiral leta 1969 na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo Univerze v Ljubljani, magistriral leta 1973 na Univerzi v Zagrebu in doktoriral leta 1975 na Univerzi v Ljubljani.