

# LOKALNI SISTEM DGPS

*doc.dr. Bojan Stopar, dr. Miran Kuhar*

*FGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana*

*Danijel Majcen*

*Geodetski Zavod Celje, Celje*

*Prispelo za objavo: 1997-10-14*

*Pripravljeno za objavo: 1997-11-18*

## Izveček

*V članku so prikazane osnove delovanja tehnike DGPS-ja za določanje položaja. Predstavljen je lokalni DGPS, podana je analiza delovanja in natančnosti sistema. Analiza natančnosti je opravljena na podlagi testnih meritev v realnem času in v načinu naknadne obdelave podatkov.*

**Ključne besede:** *DGPS, določanje položaja v realnem času, določanje položaja z naknadno obdelavo podatkov opazovanj, natančnost določitve položaja*

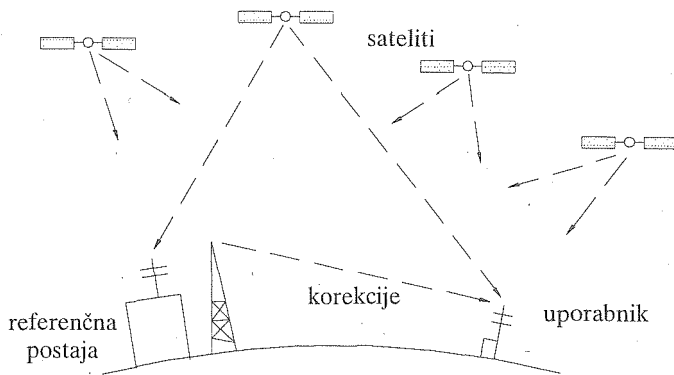
## Abstract

*The paper explains the fundamentals of the differential GPS (DGPS) positioning technique. A brief review of the local DGPS system is given. An analysis of system operation is presented especially with regard to the accuracy of determined DGPS positions in real time and in the postprocessing mode.*

**Keywords:** *accuracy of positioning, DGPS, positioning with postprocessing, real-time positioning*

## 1 OSNOVE DGPS-JA

Diferencialni GPS (DGPS) je tehnika, ki v veliki meri izboljšuje natančnost in povečuje uporabnost GPS-ja. Namenjen je predvsem civilni uporabi na področjih, kjer je absolutni položaj določen z natančnostjo  $\sigma_p \geq 100$  m premalo natančen. Sistem DGPS sestavljajo referenčni sprejemnik na znani točki in eden (ali več) mobilni sprejemnik. Znani položaj referenčnega sprejemnika je potreben za izračun popravkov izmerjenih psevdorazdalj med sateliti in referenčnim sprejemnikom. Te popravke oddajamo mobilnim sprejemnikom s pomočjo komunikacijske povezave v realnem času ali pa jih uporabimo kasneje v naknadni obdelavi podatkov. Referenčna postaja se nahaja na znanem predhodno natančno določenem položaju. Sestavljajo jo kakovostni sprejemnik GPS, računalnik, ki izračunava psevdorazdalje med sateliti in sprejemnikom in pripravlja korekcijskega sporočilo, modem in radijski oddajnik z anteno, ki korekcijsko sporočilo oddaja v eter. Opremo mobilnih sprejemnikov sestavljajo sprejemnik GPS, računalnik, modem in radijski sprejemnik z anteno.



Slika 1: Shematski prikaz DGPS-ja

Natančnost pri DGPS-ju je odvisna od natančnosti opazovanj in od geometrične razporeditve opazovanih satelitov kot pri vseh načinih določanja položaja na osnovi opazovanj GPS-ja. DGPS v veliki meri zmanjšuje pogreške, ki jih lahko obravnavamo kot enake za vse sprejemnike, ki izvajajo opazovanja na nekem območju v istem času. To so predvsem pogreški satelita, pogreški zaradi vpliva SA (Selective Availability) in delno pogreški zaradi vpliva ionosfere in troposfere na satelitski signal. Natančnost je odvisna tudi od oddaljenosti od referenčne postaje. Natančnost DGPS-ja na osnovi korekcije popravkov psevdorazdalj je od 2-5 m, z uporabo faze nosilnega valovanja se giblje v mejah 0,01-2 m.

V preglednici 1 je pregled pogreškov izmerjene psevdorazdalje za SPS (absolutni način merjenja s C/A kodo) in način DGPS-merjenja (za uporabnike na razdalji do 50 km od referenčne postaje), (Parkinson et al., 1996).

vir pogreška	določanje absolutnega položaja			določanje položaja v načinu DGPS		
	sistematični pogreški [m]	slučajni pogreški [m]	skupni pogrešek $\Sigma m$	sistematični pogreški [m]	slučajni pogreški $\Sigma m$	skupni pogrešek $\Sigma m$
efemeride	2,1	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0
ura satelita	20,0	0,7	20,0	0,0	0,7	0,7
ionosfera	4,0	0,5	4,0	0,0	0,5	0,5
troposfera	0,5	0,5	0,7	0,0	0,5	0,5
odboj signala	1,0	1,0	1,4	1,0	1,0	1,4
sprejemnik	0,5	0,2	0,5	0,0	0,2	0,2
referenčna postaja	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,4
$\sigma_{\text{psevdorazdalje}}$	20,5	1,4	20,6	1,0	1,4	1,8
prečiščeni $\sigma_{\text{psevdorazdalje}}$	20,5	0,4	20,5	1,0	0,4	1,1
skupni vertikalni pogrešek (VDOP=2,5)			51,4	2,8		
skupni položajni pogrešek (HDOP=2,0)			41,1	2,2		

Preglednica 1: Pregledni seznam pogreškov izmerjene psevdorazdalje

**D**GPS lahko razdelimo glede velikosti območja:

- DGPS z eno referenčno postajo
- lokalna mreža z več referenčnih postaj, lokalni DGPS ("Local Area DGPS" LADGPS)
- DGPS za velika območja ("Wide Area DGPS" WADGPS).

V Sloveniji bi težko uporabili WADGPS, saj le-ta zahteva najmanj 8 referenčnih postaj, kar pa je za naše območje preveč. LADGPS je lahko zasnovan kot razširjeni DGPS z eno referenčno postajo ali pa kot pravi LADGPS. Razlika med obema je v izračunu popravkov psevdorazdalj. V obeh primerih imamo torej več referenčnih postaj. Pri razširjenem navadnem DGPS-ju se popravki izberejo med najbližjimi referenčnimi postajami ali pa se popravki interpolirajo med najbližjimi postajami. Pravi LADGPS računa popravke psevdorazdalj na podlagi meritev na vseh referenčnih postajah. Načelo izračuna popravkov je splošna aritmetična sredina vseh popravkov, izračunana s pomočjo različnih algoritmov. Pogreški naraščajo z oddaljenostjo in to približno 1 mm na km razdalje.

## 2 UPORABA DGPS-JA

**D**GPS je uporaben pri številnih nalogah določanja položaja v prostoru:

- Uporaba v prometu:
  - kontrola zračnega, pomorskega in kopenskega prometa,
  - določanje položaja letal med poleti,
  - avtomatsko pristajanje letal,
  - kontrola plovbe ladij v kanalih in morskih ožinah,
  - hitro upravljanje tovornjakov, taksijev in avtobusov,
  - upravljanje z zabojniki v lukah.
- Uporaba na področju varnosti in obrambe:
  - hitro vodenje policijskih, gasilskih in reševalnih vozil,
  - nadzor transporta nevarnih snovi, denarja in dragocenosti,
  - podpora in nadzor vojaških in oborožitvenih sistemov.
- Uporaba v topografski in inženirski izmeri in:
  - izmera zemljišč v geodetske, topografske in katastrske namene,
  - kontrola položajev naravnih in zgrajenih objektov.
- Uporaba za določanje položaja za različne namene:
  - določanje položaja v geologiji, gozdarstvu, hidrografiji,
  - določanje položaja v agronomiji, arheologiji, ekologiji ...

## 3 KOREKCIJSKI PROCES V DGPS-JU

**D**GPS deluje na načelu merjenja psevdorazdalj. Če sta referenčna postaja in sprejemnik uporabnika oddaljena med seboj manj kot 500 km, sprejemata signal oddan z istih satelitov. Zato naj bi imela tudi položaj zaradi pogreškov, ki imajo svoj izvor v satelitu, enako napačen. Referenčna postaja izračunava popravke na podlagi razlike med izmerjenimi psevdorazdaljami in znanimi razdaljami do satelitov. Te popravke nato posreduje uporabnikovemu sprejemniku prek komunikacijske zveze. Pri tej metodi korekcija vsebuje popravke psevdorazdalj ali pa celo podatke o nosilnem valovanju, registriranem v referenčnem sprejemniku. Pogoj za to sta

zmožnost sprejema faze nosilnega valovanja referenčnega sprejemnika (geodetski GPS sprejemnik) in zmožnost mobilnega uporabnika, da izkoristi izmerjene faze. Za DGPS z uporabo faze nosilnega valovanja se uporablja tudi kratica CDGPS (*carrier-phase DGPS*). DGPS lahko razdelimo v dve skupini glede na čas izvedbe korekcijskega procesa:

- naknadna obdelava podatkov (*post-processing differential correction*)
- diferencialne korekcije v realnem času.

### 3.1 Naknadna obdelava podatkov

Naknadno obdelavo podatkov lahko definiramo kot uporabo popravkov opazovanj (pseudorazdalj oz. faze nosilnega valovanja) po opravljenih opazovanjih. Diferencialno popravljene položaje pridobimo z ustrežno obdelavo podatkov, pridobljenih v istem času na referenčni postaji in na mobilnem sprejemniku.

### 3.2 Diferencialne korekcije v realnem času

Postopek je podoben kot pri naknadni obdelavi podatkov, le da se tu obdelava opazovanj sedaj izvaja v realnem času. Uporabnik mora torej pridobivati potrebne popravke v času opazovanj. Za izvedbo pošiljanja korekcij je zato potrebna ustrezna komunikacijska zveza med referenčnim in mobilnim sprejemnikom. Zato mora biti na referenčni postaji radijski oddajnik, za oddajanje korekcije uporabnikom. Uporabnik mora te korekcije sprejeti in jih ustrežno obdelati med samimi opazovanji. Rezultat uporabe tehnike diferencialnih korekcij v realnem času so diferencialno popravljene položaji uporabnika, v prvem trenutku opazovanj po sprejemu korekcij.

## 4 LOKALNI DGPS

Od sredine aprila leta 1995 je na strehi stavbe FGG na Jamovi ul. 2 instaliran referenčni sprejemnik GPS za uporabo opazovanj GPS-ja v načinu DGPS-ja. V začetni fazi delovanja referenčne postaje DGPS-ja smo želeli ugotoviti in definirati predvsem:

- Vlogo geodetske stroke pri vzpostavitvi sistema DGPS-ja, to je pri:
  - zagotovitvi koordinatne osnove za delovanje DGPS-ja,
  - zagotovitvi povezave koordinatne osnove DGPS-ja in obstoječega državnega koordinatnega (kartografskega) sistema,
  - koordinatni kontroli natančnosti sistema DGPS-ja.
- Natančnost DGPS-ja pri naknadni obdelavi podatkov opazovanj in v realnem času.

### 4.1 Sestava lokalnega DGPS-ja

Naš lokalni sistem DGPS-ja tvorijo:

- Referenčni sprejemnik GPS je tip „GPS Pathfinder Community Base Station“ ameriškega podjetja Trimble navigation, ki je namenjen opravljanju funkcij referenčnega GPS-sprejemnika v načinu DGPS-ja. Sprejemnik lahko shranjuje opazovanja GPS-ja, ki jih lahko naknadno obdelamo v načinu

DGPS-ja. Prav tako pa določa popravke GPS-opazovanj v realnem času, ki jih lahko s pomočjo radijskega oddajnika oddajamo v eter.

- Komunikacijski sistem sestavljajo: radio modem DTRM-C8, radijska postaja YAESU VX-1000. Radijska postaja deluje na področju UKV-ja. Za testne meritve smo korekcije oddajali na „geodetski frekvenci“ 166,8 MHz.
- Uporabniki, ki izvajajo GPS-meritve na območju, ki ga „pokriva“ referenčni sprejemnik GPS. Pri naših testnih meritvah pa smo uporabili GPS-sprejemnik Ashtech LD XII ter sprejemnik Trimble 4000 SSE. Oba sta geodetska GPS-sprejemnika. Nekaj testnih opazovanj smo izvedli tudi z navigacijskim sprejemnikom GPS-ja Trimble Scout.

## 5 NATANČNOST LOKALNEGA DGPS-ja

Z namenom določanja natančnosti DGPS-ja pri uporabi na različnih razdaljah in določanju položaja premičnih objektov smo opravili poskusna opazovanja na območju mesta Ljubljane, Polhovega Gradca, Kranja, Radovljice in Ptuja. Vsa opazovanja so bila naknadno obdelana. Opazovanja smo opravili v t.i. delnem kinematičnem načinu, kjer na vsaki točki, katere položaj določamo, registriramo satelitski signal določen čas, in v t.i. kinematičnem načinu, kjer določamo položaj sprejemnika v gibanju. Pri vseh tovrstnih testih smo kot mobilni sprejemnik uporabili geodetski sprejemnik Astech MD-XII.

Pri poskusnih opazovanjih v načinu DGPS-ja smo kot referenčno koordinatno osnovo uporabili točke državne geodetske mreže. Položaji točk, določeni z DGPS-jem pa se nanašajo na globalni koordinatni sistem. Te položaje je zato treba transformirati v državni koordinatni sistem. Šele transformirane položaje lahko primerjamo s položaji v državnem koordinatnem sistemu.

Pri določanju natančnosti položajev v načinu DGPS-ja je treba določiti merila natančnosti, s katerimi ocenjujemo natančnost položaja. Kot merila natančnosti smo definirali notranjo in zunanjo natančnost ter maksimalno odstopanje položaja, določenega z DGPS-jem od danega položaja v državnem koordinatnem sistemu. Z notranjo natančnostjo je predstavljena razpršenost položajev opazovane točke okrog srednje vrednosti položaja točke, določene na osnovi GPS-opazovanj. Kot referenco za določitev zunanje natančnosti, ki jo predstavlja razpršenost položajev točke okrog prave vrednosti položaja pa privzamemo položaje geodetskih točk v državnem koordinatnem sistemu. Z maksimalnim odstopanjem položaja od danega položaja je predstavljeno največje odstopanje položaja, določenega v načinu DGPS-ja v enem nizu opazovanj in predstavlja najslabšo možnost določitve položaja točke, ki jo lahko pričakujemo pri enkratni določitvi položaja v načinu DGPS-ja. To merilo natančnosti je pomembno za določitev natančnosti položaja v gibanju.

Pri praktičnih nalogah se je izkazalo, da je notranja natančnost s pomočjo DGPS-ja določenih položajev točk v večini primerov – in neodvisno od oddaljenosti opazovane točke od referenčne točke v območju natančnosti, ki naj bi jo zagotavljal DGPS. To pomeni, da leži standardna deviacija položaja vedno v območju  $\sigma_{\text{P(Not)}} < 5\text{m}$ . Nekoliko slabša je zunanja natančnost, ki združuje nepravilnosti državne geodetske mreže, nenatančnost na osnovi določenih položajev DGPS-ja ter razliko nadmorskih in elipsoidnih višin (nepoznavanje geoidnih višin). Izkazalo se je,

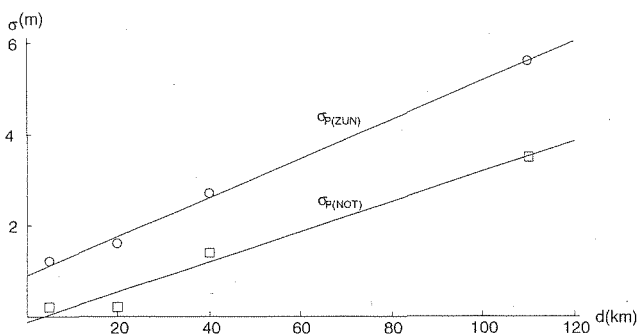
da je zunanja natančnost praviloma za 1-2 m nižja od notranje natančnosti na oddaljenostih  $d < 40$  km od referenčne točke in za 2-3 m nižja pri oddaljenostih  $d > 40$  km. Maksimalno odstopanje položaja, določenega na osnovi opazovanj DGPS-ja od pravega položaja, je prav tako odvisno od oddaljenosti od referenčne točke in je približno trikrat večje od zunanje standardne deviacije položaja. Natančnost položaja je odvisna od števila opazovanj oziroma dolžine trajanja opazovanj. Gornje trditve podajajo natančnost opazovanj, ki trajajo približno 10 minut, oziroma predstavljajo natančnost položaja točke, pridobljene na osnovi približno 60 opazovanj. Če podamo pričakovano natančnost položaja, določenega s pomočjo DGPS-ja, glede na oddaljenost od referenčne točke z razredi natančnosti, dobimo okvirne vrednosti, ki so zbrane v preglednici 2.

$d$ [km]	$\sigma_{P(NOT)}$ [m]	$\sigma_{P(ZUN)}$ [m]	$\Delta_{MAX}$ [m]
$d < 20$	0-2	1-3	8
$20 < d < 40$	1-3	2-4	14
$40 < d < 110$	2-5	5-8	18

*Preglednica 2: Pričakovana natančnost položaja določenega s pomočjo DGPS-ja glede na oddaljenost od referenčne točke*

Kot pri vseh drugih tipih GPS-opazovanj, je tudi v načinu DGPS-ja višinska komponenta položaja slabše določena kot položaj na referenčni ploskvi (ravnini oz. referenčnem elipsoidu). Če poskušamo predstaviti natančnost položaja, določenega v načinu DGPS kot linearno funkcijo oddaljenosti opazovane in referenčne točke na osnovi rezultatov poskusnih opazovanj, pridobimo premici, predstavljeni na sliki 2.

Z gornji zaključki izhajajo iz opravljenih poskusnih opazovanj. Ta opazovanja so bila opravljena v idealnih pogojih ob ugodni razporeditvi satelitov in ob neprekinjenem sprejemu signala 6-7 satelitov. V takih pogojih lahko pričakujemo zgoraj podano natančnost tudi že z 20 opazovanji oziroma z opazovanji, ki trajajo približno 3 minute. V praktični operativni uporabi pa je takšne pogoje težko zagotoviti. Potrebno natančnost položaja moramo v operativni uporabi zagotoviti s podaljšanim časom opazovanj.



*Slika 2: Natančnost položaja, pridobljenega z DGPS-jem, kot funkcija oddaljenosti od referenčne postaje*

Določanje položaja v realnem času in z naknadno obdelavo ne daje položajev, ki bi bili popolnoma enaki in enake kakovosti. Proti pričakovanjem je natančnost položajev v realnem času precej boljša od natančnosti položajev, pridobljenih pri naknadni obdelavi opazovanj. Za ugotovitev kakovosti obeh tipov opazovanj bo treba izvesti dodatna poskusna opazovanja, predvsem pa bo treba zagotoviti primerno komunikacijsko zvezo med referenčnim in mobilnimi sprejemniki. Nekateri pokazatelji kakovosti položajev, pridobljenih v realnem času in z naknadno obdelavo, so zbrani v preglednicah 3 in 4.

način določitve položaja	realni čas			naknadna obdelava		
	y [m]	x [m]	h [m]	y [m]	x [m]	h [m]
maksimalno odstopanje	10,95	-3,95	18,32	-31,11	-11,68	-60,73
minimalno odstopanje	0,003	0,005	-0,035	0,002	0,001	-0,019
aritmetična sredina	0,007	-0,305	-1,206	-0,347	-0,117	0,883

*Preglednica 3: Razpršenost položajev, pridobljenih z DGPS-jem*

realni čas			naknadna obdelava		
$\sigma_y$ [m]	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_h$ [m]	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_x$ [m]	$\sigma_h$ [m]
0,73	0,46	1,78	2,11	1,07	4,30
$\sigma_{P [m]} = 1,98$			$\sigma_{P [m]} = 4,91$		

*Preglednica 4: Natančnost položajev, pridobljenih z DGPS-jem*

## 6 ZAKLJUČEK

Testnimi opazovanji smo pridobili nekaj izkušenj, kako DGPS v praksi deluje, ter ugotovili, kakšno natančnost omogoča lokalni sistem DGPS v realnem času in v načinu naknadne obdelave podatkov. Opravljena dela lahko razvrstimo v dve skupnini. Prva je ugotovitev natančnosti DGPS-ja glede pogojev, v katerih so izvedena opazovanja (število opazovanih satelitov, njihova razporeditev, čas opazovanj, oddaljenost od referenčne postaje ...), in obnašanje položaja po transformaciji v državni koordinatni sistem na različnih oddaljenostih od referenčne postaje. Druga je pridobivanje izkušenj pri komunikacijskih zvezah za prenos popravkov v realnem času in težave, s katerimi se pri tem srečamo. Za DGPS v realnem času je radijska zveza skoraj edina možna rešitev. Zaradi razgibanosti reliefa Slovenije sta frekvenčni pas delovanja ter moč oddajnika pomembna. Pri naših testnih meritvah smo imeli težave z uporabljenimi radijsko zvezo. Ta je solidno delovala le na območju mesta Ljubljana, čeprav naj bi delovala na območju celotne ljubljanske kotline. Zato bo treba raziskave v tej smeri nadaljevati. Predvsem je treba dodatno raziskati delovanje oddajne postaje z vidika radijske tehnike.

### Literatura:

- Hofmann-Wellenhof et al, *GPS theory and practice*. Springer Verlag, Wien NewYork, 1992  
 Hum, J., *Differential GPS explained*. Trimble Navigation, 1993  
 Majcen, D. *Analiza natančnosti diferencialnega GPS*. Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, FGG, Oddelek za geodezijo, 1996

*Parkinson, B., Spilker, J., GPS theory and applications. Vol. I in II, Washington, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1996*

*Vodopivec, F. et al., Projekt uvajanja sodobnih tehnologij v Republiki Sloveniji. Raziskovalna naloga, UL FGG, Oddelek za geodezijo, 1996*

*Wells, W., Guide to GPS positioning. New Brunswick, Canadian GPS Associates, 1985*

*Recenzija: Andrej Bilc*

*prof.dr. Florjan Vodopivec*