

IZRAČUN POLOŽAJA GPS-SATELITA IZ PODATKOV ODDANIH EFEMERID

GPS-ORBIT COMPUTATION FROM BROADCAST EPHEMERIS DATA

Polona Pavlovčič Prešeren, Bojan Stopar

UDK: 528.28:629:783

POVZETEK

V prispevku opisujemo teoretične osnove uporabe podatkov oddanih (angl. broadcast) GPS-efemerid, ene izmed vrst podatkov, ki jih nujno potrebujemo pri obdelavi GPS-opazovanj. Izhodišče tovrstne metode izračuna položaja GPS-satelita na tirnici predstavljajo podatki navigacijskega poročila, ki jih glavna kontrolna postaja v Colorado Springsu preko GPS-satelitov posreduje uporabnikom. Poleg teoretičnih osnov obravnave podatkov efemerid in nadaljnega izračuna podajamo glavne značilnosti oddanih efemerid, ki jih je treba poznati v povezavi z različnimi metodami GPS-izmere. Na praktičnem primeru uporabe oddanih efemerid za določitev položaja GPS-satelita na tirnici predstavljamo rezultate izračuna za časovni interval 4 ur ter odstopanje rezultatov od podatkov najhitrejših in končnih preciznih efemerid službe IGS.

KLJUČNE BESEDE

oddane/precizne efemeride, glavna kontrolna postaja, navigacijsko sporočilo, metode GPS-izmere, najhitrejše/končne precizne efemeride službe IGS

UVOD

Zahteve po vedno večji točnosti določitve položaja objektov na zemeljski površini iz rezultatov obdelave GPS-opazovanj ter razvoj novih metod GPS-izmere uporabnika vedno bolj silijo v situacijo, ko bo moral poznati značilnosti postopka obdelave GPS-opazovanj. Sedaj je obdelava GPS-opazovanj v različnih programskih paketih avtomatizirana do take mere, da uporabnik nima vpogleda v izvedbo in obdelavo podatkov opazovanj. Tudi izdelovalci programske opreme so se z omejitvijo vpogleda v programsko kodo zaščitili pred tem, da bi uporabnik nadzira

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

ABSTRACT

The article describes the theoretical point of view of the GPS-broadcast ephemerides application. Beside the raw GPS observations, any kind of GPS ephemerides represents indispensable data in the GPS processing engine. Broadcast ephemerides have been produced in the central Control Station in Colorado Springs and interposed from GPS satellites to the users as part of the GPS navigation message. The article focuses on the theoretical broadcast-ephemeris-data treatment for computing the position of a GPS satellite. The reason for the orbit-problem explanation is that anyone who uses any GPS measurement methods should be aware of the advantages and disadvantages of the ephemeris data. Thus, numerical examples of GPS-satellite position computation for 4-hour time span from broadcast ephemerides and deviations of the results regarding the IGS ultra-rapid and IGS final precise ephemerides are presented in the article.

KEY WORDS

broadcast/precise ephemerides, central control station, navigation message, GPS measurement methods, IGS ultra-rapid/final precise ephemerides

rešitve problemov. Izhod iz te situacije predstavlja izdelava lastne programe opreme za nekatere segmente obdelave GPS-opazovanj, ki nam lahko podajajo odgovore na nekatera vprašanja.

V obdelavi GPS-opazovanj vključitev ustreznih tipov GPS-efemerid¹ predstavlja pomembno osnovo za kakovostno določitev položaja objekta na zemeljskem površju. V povezavi s problematiko uporabe ustreznih podatkov efemerid je pri izvedbi RTK-metode GPS-izmere pomembno vedeti kdaj in zakaj je dobro ponovno izvesti inicializacijo². Večina trenutno dostopnega instrumentarija za izvedbo RTK-metode izmere ima namreč vgrajene programsko opremo, ki omogoča obdelavo opazovanj v realnem času le na osnovi oddanih (angl. broadcast), ne pa tudi najhitrejših preciznih efemerid (angl. ultra-rapid ephemerides) službe IGS (angl. International GPS Service), ki jih lahko pridobimo tudi vnaprej. Ker se natančnost določitve položaja GPS-satelita na tirnici s starostjo podatkov oddanih efemerid slabša, se na to nanaša povsem utemeljeno vprašanje o vplivu kakovosti oddanih efemerid na določitev položaja objekta na zemeljski površini.

V članku predstavljeni podatki ter postopki izračuna položaja GPS-satelita na tirnici ter praktični izračuni naj bi uporabnika GPS-tehnologije napeljali k razmišljanju, kako izvesti terensko izmero in morebitno naknadno obdelavo GPS-opazovanj tako, da bo dosežena točnost določitve položajev objektov na zemeljski površini optimalna. Hkrati podajamo tudi teoretično obrazložitev uporabe podatkov oddanih efemerid v obliki, ki omogoča komurkoli izdelavo lastene programske opreme. Članek je prvi v seriji člankov, ki nastajajo na temo obdelave GPS-opazovanj. Tokrat rezultate obdelave oddanih efemerid primerjamo s podatki preciznih efemerid, v prihodnje pa bomo pokazali metode uporabe podatkov preciznih efemerid za določitev položaja GPS-satelita na tirnici.

1 PODATKI ODDANIH EFEMERID

Tipe GPS-efemerid razlikujemo glede načina in hitrosti pridobitve kot tudi glede oblike podatkov, ki jih vsebujejo. S hitrostjo pridobitve podatkov je povezana natančnost določitve položaja GPS-satelita na tirnici. Ker oddane efemeride pripravijo vnaprej na osnovi nekaterih predpostavk o gibanju GPS-satelitov, je začetna natančnost določitve položaja slabša od preciznih efemerid, ki so določene naknadno.

1.1 Način pridobitve oddanih efemerid

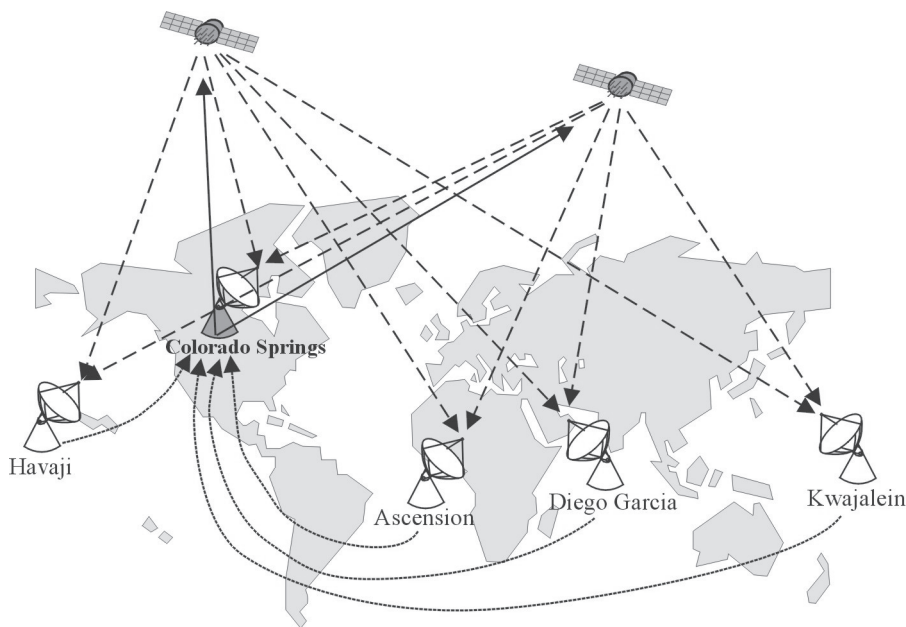
Navigacijske satelitske tehnologije so specifične s stališča pridobivanja podatkov za določitev položajev GPS-satelitov kot načina izračuna gibanja GPS-satelitov po tirnici. GPS-satelitska navigacija je bila zasnovana tako, da uporabnik hkrati z GPS-opazovanji pridobi tudi podatke za izračun položajev GPS-satelitov v katerem koli trenutku – v obliki oddanih efemerid. Druga možnost obdelave GPS-opazovanj je uporaba preciznih efemerid, ki jih GPS-službe uporabnikom posredujejo preko spleta.

¹ Efemeride (astr.): periodična publikacija s podatki o legah nebesnih teles; termin GPS-efemeride uporabljamo za predstavitev digitalne publikacije s podatki za določitev položajev GPS-satelitov.

² Inicializacija je postopek, vezan na kinematične metode GPS-izmere. S terminom opisujemo izračun neznanega števila celih valov v začetnem trenutku opazovanj, ki ga praktično izvedemo na premikajoči enoti, preden začnemo z izmero.

GPS-sateliti oddajajo opazovanja na nosilnih valovanjih L1 in L2, ki jih poleg uporabnikov prejemajo tudi opazovalne postaje, razporejene vzdolž ekvatorja (Havaji, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein in glavna postaja v Colorado Springsu). Te opazovanja pošiljajo v glavno kontrolno postajo v Colorado Springsu, kjer se izvaja obdelava in izračun podatkov efemerid satelitov za vsaj 24 ur vnaprej. Podatke efemerid iz Colorado Springsa posredujejo GPS-satelitom, ki jih ti nato poleg opazovanj v obliki navigacijskega sporočila posredujejo uporabnikom na zemeljskem površju (slika 1).

Glavna kontrolna postaja vsakemu GPS-satelitu posreduje zanj značilne podatke ter del podatkov, ki se nanašajo na vse GPS-satelite (almanah³). Zaradi morebitnih komunikacijskih težav med kontrolnim in vesoljskim segmentom GPS-satelitom dodatno posreduje tudi podatke za nekaj tednov vnaprej. Ko GPS-sateliti dobijo vsebino podatkov efemerid, jo po delih posredujejo uporabnikom.



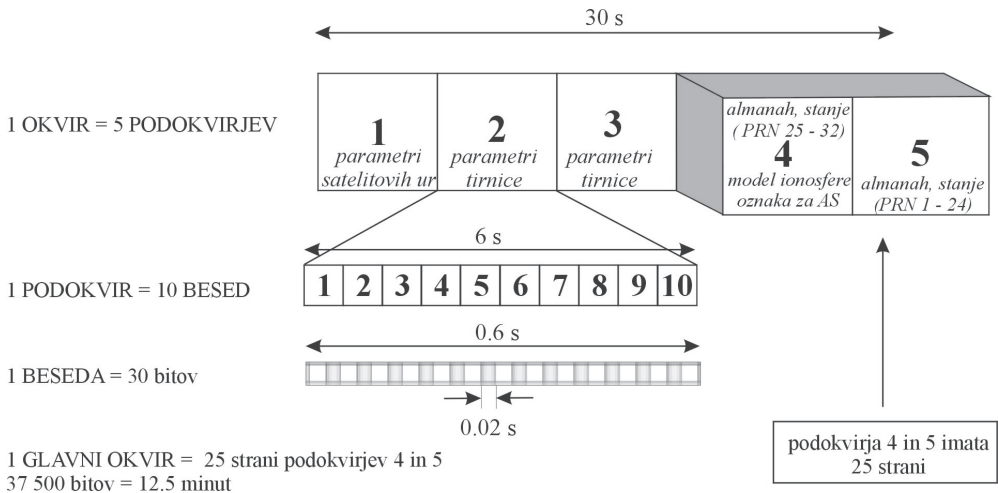
Slika 1: Razporeditev zemeljskih kontrolnih postaj in potek pretoka podatkov za določitev navigacijskega sporočila.

Oddane GPS-efemeride so sestavni del GPS-navigacijskega sporočila. GPS-navigacijsko sporočilo je 50 bps koda (50 bitov v sekundi), modulirana na nosilni valovanji vsakega GPS-satelita z drugimi kodami. Gre za telemetrično sporočilo, kjer oddaja podatkov poteka 30 sekund v logičnih enotah, imenovanih okvirji (dolžina je 1500 bitov). GPS-satelit odda okvir navigacijskega sporočila vsako minuto oziroma na polovico minute, odvisno od tipa vgrajenih ur.

³ GPS-almanah vsebuje podatke za določitev položajev vseh delujočih GPS-satelitov za mesec dni vnaprej, zato je uporabno orodje v postopku planiranja GPS-izmere.

Okvir navigacijskega sporočila sestavlja 5 podokvirjev, dolgih 300 bitov (slika 2). Podokvirji 1, 2 in 3 vsebujejo podatke o stanjih satelitovih ur ter podatke oddanih efemerid. Ti podatki so specifični za posamezne GPS-satelite, kar pomeni, da GPS-satelit oddaja izključno lastne podatke. Vsebina podatkov podokvirjev 1, 2 in 3 je enaka za vse zaporedne okvirje posameznega GPS-satelita za periodo dveh ur. Nove podatke GPS-sateliti začnejo oddajati vsako uro ali vsaki dve uri.

V splošnem podokvir 1 (preglednica 1) vsebuje koeficiente polinoma druge stopnje, ki jih potrebujemo za izračun urinih tekov satelitovih ur. Podokvirja 2 in 3 vsebujeta parametre tirnice (preglednica 2). Podokvirja 4 in 5 sta za vse GPS-satelite enaka, vendar po vsebini podatkov specifična, saj ima vsak podokvir naslednjega okvirja drugačno vsebino podatkov. Da dobimo navigacijsko sporočilo v popolni obliki, moramo s sprejemnikom sprejeti 25 zaporednih okvirjev navigacijskega sporočila (ker vsak okvir vsebuje drugačne podatke v podokvirjih 4 in 5), kar traja 12,5 minut. GPS-satelit prične oddajati enak niz vsebine novih podatkov v sporočilih 4 in 5, ko dobi nove podatke iz glavne kontrolne postaje.



Slika 2: Struktura GPS-navigacijskega sporočila.

Podokvir sestavlja 10 besed, dolgih 30 bitov (6 sekund). Prvih šest bitov je namenjenih usklajevanju. 24 bitov v besedah od 3 do 10 je rezerviranih za vsebino podatkov efemerid. Besedi 1 in 2 imata v vsakem podokvirju enako obliko zapisa podatkov. Prvih 8 bitov v besedi 1 je namenjenih sinhronizaciji GPS-sprejemnika, za pravilno dekodiranje vsebine podatkov navigacijskega sporočila. Beseda 2 vsebuje zaokroženi Z-števec – to je števec za čas, določen glede na satelitove ure, in opisuje konec podokvirja, ki ga GPS-satelit trenutno oddaja (popolno Z-štetje ima faktor 1.5 sekunde in je ena izmed osnovnih enot GPS-časa).

Iz glavne kontrolne postaje so novo posredovani podatki navigacijskega sporočila zapisani v obliki 16-ih podokvirjev 1, 2 in 3 za posamezne GPS-satelite, saj ti podatke podokvirjev lahko

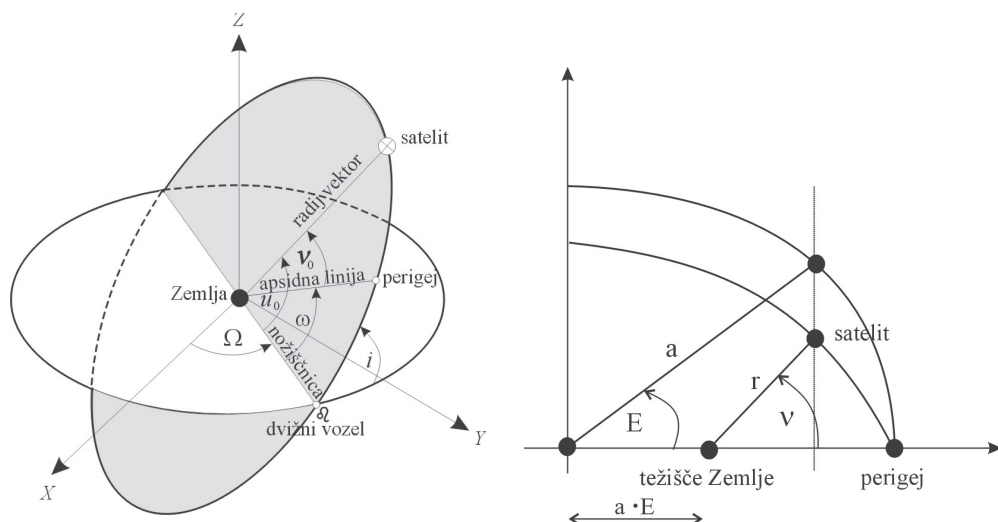
oddajajo največ 2 uri. GPS-satelit lahko začne oddajati novi niz podatkov v kateremkoli trenutku (angl. cutover), naslednje posredovanje podatkov pa poteka spet točno ob določeni uri.

Večina GPS-sprejemnikov lahko neprenehoma spremlja gibanje GPS-satelitov nad obzorjem. V tem času poteka demodulacija podatkov navigacijskega sporočila tako, da programje sprejemnika poizkuša zaznati spremembe v podokvirjih 1, 2 in 3. Ko pride do sprememb vsebine se uporabi novi niz podatkov oddanih efemerid.

Podatki v podokvirjih 1, 2 in 3 so določeni tako, da so parametri ur in podatki tirnic GPS-satelitov določeni za periodo štirih ur (včasih tudi 6 ur) z najvišjo kakovostjo podatkov približno v sredini periode. Ker GPS-sateliti iste podatke oddajajo največ dve uri, je trenutek optimalne uporabnosti podatkov efemerid v času pred zamenjavo vsebine podatkov podokvirjev 1, 2 in 3. Nasprotno pa GPS-sprejemnik almanah pridobi le preko enega GPS-satelita in ga ne ažurira vsakih 12,5 minut. V primeru izklopa GPS-sprejemnika ta po ponovnem vklopu uporabi v spominu shranjeni almanah in zadnje podokvirje 1, 2 in 3 navigacijskega sporočila. Če je izklop trajal več kot dve uri, pa z navigacijo lahko pričnemo šele, ko sprejemnik dobi novi niz podatkov navigacijskega sporočila.

1.2 Oblika podatkov oddanih efemerid

GPS-efemeride med drugim razlikujemo tudi glede oblike podatkov, ki jih vsebujejo. Precizne efemeride vsebujejo podatke o diskretnih položajih GPS-satelitov v terestričnem koordinatnem sistemu, oddane efemeride pa elemente Keplerjeve elipse tira s pripadajočimi popravki (preglednica 2).



Slika 3: Tirnica GPS-satelita v nebesnem koordinatnem sistemu s Keplerjevimi elementi elipse tira. Na sliki desno podrobneje predstavljamo veliko polos elipse tira a , ekscentrično anomalijo E in pravo anomalijo n (Zebhauser, 1999).

Keplerjevi elementi elipse tira, predstavljeni na sliki 3, so:

- a velika polos elipse tira
- e ekscentriciteta, ki jo izračunamo kot $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$; b je mala polos elipse tira
- i inklinacija
- Ω rektascenzija dvižnega vozla
- M srednja anomalija
- E ekscentrična anomalija
- v prava anomalija
- ω argument perigeja
- u argument širine, ki ga izračunamo kot: $u = \omega + v$
- r radij vektor GPS-satelita.

Glede na to, da se GPS-satelit giblje v Zemljinem težnostnem polju, obremenjenim tudi z ostalimi vplivi, dejanska tirnica, ki jo satelit opiše, odstopa od Keplerjeve elipse tira. Govorimo o motenem Keplerjevem gibanju, ki ga je pri izračunu položaja GPS-satelita na tirnici treba upoštevati. V primeru uporabe podatkov oddanih efemerid so problem rešili tako, da poleg Keplerjevih elementov elipse tira podajajo tudi amplitude sprememb v elementih, ki so najbolj občutljivi na zunanje vplive: tj. dolžina radij vektorja r, inklinacija i in argument širine u.

1.3 Podatki oddanih efemerid v formatu RINEX

Parametri za izračun položaja GPS-satelita v terestričnem koordinatnem sistemu so sestavni del datoteke z navigacijskim sporočilom. Del podatkov navigacijskega sporočila, ki so predstavljeni v formatu RINEX (angl. Receiver INdependent EXchange format), so Keplerjevi elementi elipse tira in pripadajoči popravki le-teh, ki so predstavljeni kot harmonični koeficienti. Parametre so razvrstili v osem vrstic, kjer se v vsaki vrstici v ustreznih enotah nahajajo numerične vrednosti štirih parametrov (v prvi jih je več). Tu so pravzaprav zapisani podatki prvih treh podokvirjev navigacijskega sporočila prvega GPS-satelita, v nadaljnjih osmih vrsticah pa podatki prvih treh podokvirjev navigacijskega sporočila drugega GPS-satelita, katerega opazovanja smo v danem trenutku sprejemali ...

Na sliki 4 predstavljamo izsek iz RINEX-datoteke z navigacijskim sporočilom, ki vsebuje podatke za izračun satelita PRN 6 za 1. marec 2004 ob 4^h 00^{min} 00^s po GPS-času. Prazne vrstice in odebeljeno besedilo v le-teh so namenjeni obrazložitvi parametrov v nizu podatkov oddanih efemerid in niso sestavni del osnovne oblike podatkov v datotekah RINEX *.yyN (yy sta zadnji številki tekočega leta). Obrazložitev parametrov prvega in drugega podokvira navigacijskega sporočila podajamo v preglednici 1 oziroma v preglednici 2.

```

PRN leto mesec dan h min s a0[ms] a1 [ms/dan] a2 [ms/dan^2]
6 04 3 1 4 0 0.0-1.374632120132D-06-1.023181539495D-12 0.000000000000D+00
 IODE [s] Crs [m] Δn [rad/s] M0 [rad]
5.400000000000D+01 2.331250000000D+01 5.205573975908D-09 1.062039696776D+00
 Cuc [rad] e Cus [rad] sqrt(a) [sqrt(m)]
1.234933733940D-06 6.265778676607D-03 7.264316082001D-06 5.153553974152D+03
 Toe [s v GPS-tednu] Cic [rad] Ω [rad] Cis [rad]
1.008000000000D+05-8.009374141693D-08 1.335680693011D+00 7.450580596924D-09
 i0 [rad] Crc [m] ω [rad/s] Ω̇ [rad/s]
9.358996395195D-01 2.288750000000D+02-2.029457588860D+00-8.346419090428D-09
 i_pika [rad/s] L2-koda GPS-teden P2-znak
-2.732256666600D-10 0.000000000000D+00 1.260000000000D+03 0.000000000000D+00
 natančnost [m] stanje satelita Tgd[s] IODC
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-4.656612873077D-09 5.660000000000D+02
 oddaja sporočila (s v GPS-tednu)
9.360000000000D+04

```

Slika 4: Izsek iz RINEX-datoteke z navigacijskim sporočilom.

Oznaka	Poimenovanje	Vrstica, stolpec v RINEX-u
a_0	parametri urinega teka satelitove ure (1. koeficient polinoma)	1, 2
a_1	parametri urinega teka satelitove ure (2. koeficient polinoma)	1, 3
a_2	parametri urinega teka satelitove ure (3. koeficient polinoma)	1, 4
L2-koda	kodna opazovanja na frekvenci L2	6, 2
GPS-teden	GPS-teden, ki se navezuje na referenčni trenutek za efemeride (Toe)	6, 3
P2-znak	oznaka za P2-kodo	6, 4
Natančnost	Natančnost satelita	7, 1
stanje	stanje satelita (1 = okvara, 0 = v redu)	7, 2
T _{GD}	diferencialna kodna zakasnitev	7, 3
IODC	izdaja podatkov o satelitovih urah (angl. Issue of Data Clock)	7, 4
Oddaja sporočila	trenutek oddaje sporočila (sekunde v GPS-tednu, izpeljano iz Z-štetja)	8, 1

Preglednica 1: Parametri prvega podokvira navigacijskega sporočila in določitev mesta zapisa parametrov v datoteki RINEX *.yyN (Strang & Borre, 1997).

Oznaka	Poimenovanje	Vrstica, stolpec v RINEX-u
IODE	izdaja podatkov o efemeridah (angl. Issue of Data – Ephemerides)	2, 1
C_{rs}	amplituda sinusnega harmoničnega izraza za radij vektor	2, 2
Δn	popravek srednje anomalije	2, 3
M₀	srednja anomalija v trenutku t ₀	2, 4
C_{uc}	amplituda kosinusnega harmoničnega izraza za argument širine	3, 1
e	ekscentriciteta Keplerjeve elipse tira	3, 2
C_{us}	amplituda sinusnega harmoničnega izraza za argument airine	3, 3
sqrt(a)	kvadratni koren velike polosi elipse tira	3, 4
T_{oc}	Trenutek, na katerega se nanašajo efemeride (angl. Time of Ephemerides)	4, 1
C_{ic}	amplituda kosinusnega harmoničnega izraza za inklinacijo	4, 2
Ω₀	rektascenzija dvižnega vozla v t ₀	4, 3
C_{is}	amplituda sinusnega harmoničnega izraza za inklinacijo	4, 4
i₀	inklinacija elipse tira v trenutku t ₀	5, 1
C_{rc}	amplituda kosinusnega harmoničnega izraza za radij vektor	5, 2
ω	argument perigeja v trenutku t ₀	5, 3
Ω̇	sprememba rektascenzije v času ($d\Omega/dT$)	5, 4
i_pika = i̇	sprememba inklinacije v času (di/dt)	6,1

Preglednica 2: Parametri drugega in tretjega podokvirja navigacijskega sporočila in razvrstitev glede na mesto zapisa v datotekah RINEX *.yyN (Strang & Borre, 1997).

2 IZRAČUN POLOŽAJA GPS-SATELITA IZ PODATKOV ODDANIH EFEMERID

Položaj GPS-satelita v terestričnem koordinatnem sistemu za določen trenutek t določimo z obdelavo podatkov iz drugega in tretjega podokvirja navigacijskega sporočila (preglednica 2). Pri tem upoštevamo tudi parametre urinih tekov satelitovih ur iz prvega podokvirja navigacijskega sporočila (preglednica 1) ter konstante (Preglednica 3).

Oznaka	Vrednost	Poimenovanje
c	299 792.458 m/s	svetlobna hitrost v vakuumu
GM_{\oplus}	$398\,600\,441.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}^2$	produkt gravitacijske konstante G in mase Zemlje M_{\oplus}
Ω_{\oplus}	$7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	kotna hitrost rotacije Zemlje
GPS-teden	604 800 s	GPS-teden

Preglednica 3: Konstante, vključene v izračun položaja GPS-satelita iz oddanih efemerid (IAG, 1995).

Določitev položaja GPS-satelita v kvazigeocentričnem koordinatnem sistemu WGS-84 (angl. World Geodetic System 1984) poteka po zaporedju korakov, opisanih v nadaljnjih podpoglavjih.

2.1 Določitev velikosti splošnega relativističnega vpliva r_k na Keplerjevo elipso tira

Ker se GPS-satelit giblje v težnostnem polju Zemlje, je pri izračunu trenutka oddaje GPS-signala treba upoštevati tudi vplive, ki izhajajo iz splošne teorije relativnosti. Ta govori, da se objekti v vesolju sicer poskušajo gibati po ravnih tirih, vendar se zdi, da so njihove poti zaradi gravitacije ukrivljene, ker je ukrivljen sam prostor-čas (Hawking, 2002). Ukrivljenost prostor-časa v primeru oddanih efemerid upoštevamo pri določitvi dejanskega trenutka oddaje GPS-signala. Tako je treba upoštevati spremembo urinih tekov satelitovih ur zaradi spremenljive oddaljenosti GPS-satelitov od težišča Zemlje.

V poenostavljeni obliki velikost splošnega relativističnega popravka r_k izrazimo kot funkcijo gravitacijske konstante G, mase Zemlje M_{\oplus} in svetlobne hitrosti c z upoštevanjem velikosti Keplerjeve elipse tira (a in e) (Zebhauser, 1999):

$$r_k = \frac{-2 \cdot e \cdot \sqrt{GM_{\oplus}} \cdot a}{c^2} = -e \cdot \sqrt{a} \cdot 4.442807309 \cdot 10^{-10} \frac{\text{s}}{\sqrt{\text{m}}} \quad (1)$$

Velikost relativističnega vpliva za določen položaj GPS-satelita določimo v odvisnosti od ekscentrične anomalije elipse tira E (četrti člen izraza 8).

2.2 Izračun trenutka oddaje GPS-signala (GPS-čas)

Oddane efemeride se navezujejo na GPS-časovni sistem. Trenutek oddaje signala T_0 glede na trenutek sprejema signala tt določimo posredno s pomočjo opazovane psevdorazdalje PR, ki jo dobimo iz RINEX-datoteke z opazovanji:

$$T_0 = tt - \frac{PR}{c} \quad (2)$$

razliko trenutkov (dt) oddaje signala T_0 in trenutka, na katerega se nanašajo efemeride T_{oe} , pa kot:

$$dt = T_0 - T_{oe} \quad (3)$$

Pred izračunom srednje anomalije M moramo upoštevati še popravljeno srednje gibanje n:

$$n = n_0 + \Delta n \quad (4)$$

in iz izraza:

$$n_0 = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{a^3}} \quad (5)$$

določiti vrednost za M_0 .

Srednjo anomalijo $M(dt)$ v aktualnem trenutku dt izrazimo kot:

$$M(dt) = M_0 + n \cdot dt \quad (6)$$

ekscentrično anomalijo E pa določimo iterativno s pomočjo izraza:

$$E_i = M(dt) + e \cdot \sin(E_{i-1}), \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Relativistični vpliv r_k na ekscentriciteto Keplerjeve elipse tira e in popravke zaradi pogreškov satelitovih ur upoštevamo pri določitvi popravka v trenutku oddaje signala ΔT :

$$\Delta T = a_0 + a_1 \cdot dt + a_2 \cdot (dt)^2 + r_k \cdot \sin(E), \quad (8)$$

tako da dejanski trenutek oddaje signala dt zmanjšamo za izračunano vrednost ΔT :

$$dt^s = dt - \Delta T \quad (9)$$

2.3 Določitev Keplerjevih elementov elipse tira in popravkov le-teh zaradi zunanjih sil

Določene elemente Keplerjeve elipse tira dobimo direktno iz navigacijskega sporočila, druge je treba iz teh izračunati. Tako iz srednje anomalije v trenutku oddaje signala $M(t^s)$:

$$M(dt^s) = M_0 + n \cdot dt^s \quad (10)$$

določimo ekscentrično anomalijo E iterativno:

$$M(dt^s) = E - e \cdot \sin(E) \quad (11)$$

kjer velja: $E_0 = E$ iz točke 2.2:

$$E_i = M(dt^s) + e \cdot \sin(E_{i-1}), \quad i = 1, \dots, n \quad (12)$$

S pomočjo prave anomalije v , ki jo izračunamo iz izraza:

$$v = \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin(E)}{\cos(E) - e} \right) \quad (13)$$

določimo argument širine u :

$$u = \omega + v, \quad (14)$$

ki ga v nadaljevanju uporabimo tudi kot argument sinusa oziroma kosinusa v izrazih za izračun popravkov določenih elementov elipse tira zaradi vpliva zunanjih sil.

Popravke argumenta širine Δu , dolžine radij vektorja Δr in inklinacije Δi zaradi zunanjih vplivov določimo kot:

$$\begin{aligned}\Delta u &= C_{us} \cdot \sin(2u) + C_{uc} \cdot \cos(2u) \\ \Delta r &= C_{rs} \cdot \sin(2u) + C_{rc} \cdot \cos(2u) \\ \Delta i &= C_{is} \cdot \sin(2u) + C_{ic} \cdot \cos(2u)\end{aligned}\quad (15)$$

in jih naprej uporabimo za izračun argumenta širine (16), dolžine radij vektorja (17) in inklinacije (18):

$$u = u + \Delta u, \quad (16)$$

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos(E)) + \Delta r, \quad (17)$$

$$i = i_0 + \Delta i + \dot{i} \cdot dt^s. \quad (18)$$

Na ta način smo pravzaprav izvedli prehod iz idealnega Keplerjevega gibanja po elipsi tira v tako imenovano moteno gibanje GPS-satelita zaradi delovanja zunanjih sil.

Popraviti je treba še rektascenzijo dvižnega vozla Ω , ki jo izračunamo z upoštevanjem popravkov v gibanju GPS-satelita in Zemlje:

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_{\oplus}) \cdot dt^s - \dot{\Omega}_{\oplus} \cdot T_{oe}. \quad (19)$$

S korakom, opisanim z enačbo (19), smo zaključili s pripravo podatkov za izračun položaja GPS-satelita v ravnini elipse tira ($x_{\text{tir}}, y_{\text{tir}}$) oziroma v prostoru (x, y, z). Zgoraj opisani način določitve položaja GPS-satelita se nanaša na določitev položaja v terestričnem koordinatnem sistemu, saj smo v izračun rektascenzije dvižnega vozla Ω vključili tudi rotacijo Zemlje. Če je ne bi in bi hkrati zanemarili še vplive precesije, nutacije in gibanja polov, ki so vključeni v sinusne in kosinusne harmonične koeficiente, bi lahko položaj GPS-satelita določili tudi v nebesnem koordinatnem sistemu.

2.4 Določitev položaja GPS-satelita v terestričnem koordinatnem sistemu

Položaj GPS-satelita v ravnini tirnice določimo z izrazoma:

$$x_{\text{tir}} = r \cdot \cos(u) \quad y_{\text{tir}} = r \cdot \sin(u). \quad (20)$$

Prehod iz ravnine elipse tira v terestrični koordinatni sistem naredimo z rotacijo nožičnice za rektascenzijo dvižnega vozla Ω , z rotacijo za inklinacijo i in zasukom za argument širine u , kar lahko zapišemo kot:

$$[x, y, z]^T = r \cdot R_z(\Omega) \cdot R_x(i) \cdot R_z(u), \quad (21)$$

rotacijske matrike pa izračunamo kot:

$$R_z(\Omega) = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\sin(\Omega) & 0 \\ \sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_x(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & -\sin(i) \\ 0 & \sin(i) & \cos(i) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$R_z(u) = \begin{bmatrix} \cos(u) & -\sin(u) & 0 \\ \sin(u) & \cos(u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Matrične izraze (21) in (22) lahko poenostavimo v izraze:

$$\begin{aligned} x &= x_{\text{tir}} \cdot \cos(\Omega) - y_{\text{tir}} \cdot \cos(i) \cdot \sin(\Omega) \\ y &= x_{\text{tir}} \cdot \sin(\Omega) + y_{\text{tir}} \cdot \cos(i) \cdot \cos(\Omega) \\ z &= y_{\text{tir}} \cdot \sin(i). \end{aligned} \quad (23)$$

3 NUMERICNA PRIMERA IZRAČUNA POLOŽAJEV GPS-SATELITA

3.1 Izračun položajev GPS-satelita za interval 15 minut za obdobje starosti oddanih efemerid 4 ure

Iz datoteke oddanih efemerid *auto0610.04n* za izbrani trenutek $6^{\text{h}} 00^{\text{min}} 00^{\text{s}}$ GPS-časa smo Keplerjeve elemente elipse tira s pripadajočimi popravki predstavili na sliki 4. Od tod izračunamo položaj GPS-satelita v terestričnem koordinatnem sistemu. Izbor terestričnega koordinatnega sistema je vezan na nadaljnjo primerjavo rezultatov izračuna s podatki v preciznih efemeridah službe IGS, ki so prav tako dani v terestričnem koordinatnem sistemu IGS2000 (datoteki *igs12341.sp3* in *igu12600_12.sp3*).

V preglednici 4 predstavljamo odstopanja položajev za satelit PRN 6 iz oddanih in končnih preciznih efemerid IGS za zaporedne 15-minutne trenutke ter za starost podatkov oddanih efemerid 4 ure. V preglednici 5 pa predstavljamo odstopanja položajev za satelit PRN 6 iz oddanih ter najhitrejših preciznih efemerid službe IGS prav tako za obdobje starosti oddanih efemerid 4 ure. Ker so odstopanja v koordinatnih komponentah za prvi in drugi primer približno enaka (razlike so le nekaj centimetrov), jih predstavljamo skupaj na grafu 1. Podobno velja tudi za odstopanja v dolžinah radij vektorjev, zato jih predstavljamo skupaj na grafu 2.

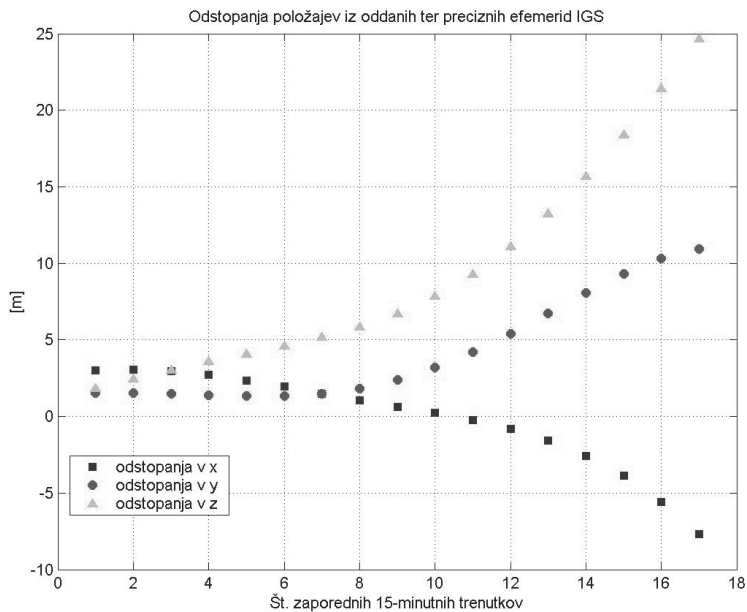
Starost efe. hh – mm – ss	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	Δr [m]
0 – 00 – 00	2.9942	1.5507	1.8143	3.8291
0 – 15 – 00	3.0604	1.5496	2.4392	4.2092
0 – 30 – 00	2.9581	1.4927	3.0302	4.4901

0 – 45 – 00	2.7128	1.4076	3.5752	4.7035
1 – 00 – 00	2.3573	1.3461	4.0850	4.9047
1 – 15 – 00	1.9393	1.3593	4.5873	5.1626
1 – 30 – 00	1.5000	1.5065	5.1432	5.5652
1 – 45 – 00	1.0641	1.8366	5.8203	6.1953
2 – 00 – 00	0.6418	2.3891	6.6975	7.1398
2 – 15 – 00	0.2189	3.1788	7.8363	8.4593
2 – 30 – 00	-0.2470	4.1985	9.2891	10.1969
2 – 45 – 00	-0.8176	5.4093	11.0780	12.3552
3 – 00 – 00	-1.5628	6.7368	13.2075	14.9085
3 – 15 – 00	-2.5602	8.0831	15.6550	17.8037
3 – 30 – 00	-3.8766	9.3229	18.3927	20.9818
3 – 45 – 00	-5.5738	10.3164	21.3927	24.3956
4 – 00 – 00	-7.6876	10.9334	24.6423	28.0336

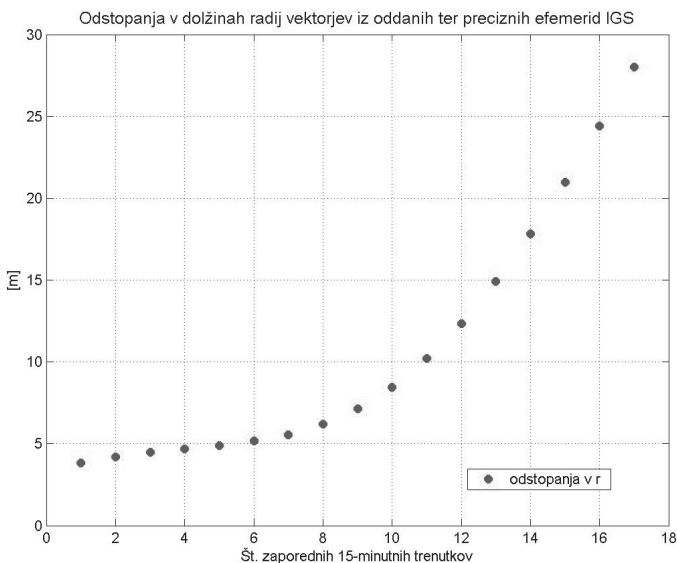
Preglednica 4: Odstopanja položajev GPS-satelita PRN 6 iz oddanih in končnih preciznih efemerid službe IGS (datoteka igs12341.sp3) za obdobje starosti efemerid 4 ure.

Starost efe. hh – mm – ss	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	Δr [m]
0 – 00 – 00	3.0072	1.5157	1.7983	3.8177
0 – 15 – 00	3.0644	1.5176	2.4172	4.1877
0 – 30 – 00	2.9571	1.4647	3.0032	4.4620
0 – 45 – 00	2.7058	1.3876	3.5402	4.6669
1 – 00 – 00	2.3483	1.3321	4.0410	4.8599
1 – 15 – 00	1.9283	1.3543	4.5373	5.1127
1 – 30 – 00	1.4880	1.5085	5.0862	5.5099
1 – 45 – 00	1.0541	1.8476	5.7603	6.1405
2 – 00 – 00	0.6358	2.4071	6.6325	7.0844
2 – 15 – 00	0.2149	3.2038	7.7673	8.4048
2 – 30 – 00	-0.2490	4.2285	9.2181	10.1448
2 – 45 – 00	-0.8166	5.4413	11.0080	12.3065
3 – 00 – 00	-1.5598	6.7718	13.1365	14.8613
3 – 15 – 00	-2.5542	8.1211	15.5860	17.7595
3 – 30 – 00	-3.8716	9.3609	18.3247	20.9382
3 – 45 – 00	-5.5688	10.3554	21.3277	24.3540
4 – 00 – 00	-7.6876	10.9704	24.5813	27.9944

Preglednica 5: Odstopanja položajev GPS-satelita PRN 6 iz oddanih in najhitrejših efemerid službe IGS (datoteka igu12600_12.sp3) za obdobje starosti efemerid 4 ure.



Graf 1: Prikaz odstopanj položajev satelita PRN 6, predstavljenih v preglednici 4 in preglednici 5.



Graf 2: Prikaz razlik v dolžinah radij vektorjev r iz oddanih ter preciznih efemerid službe IGS, ki so predstavljeni v preglednici 4 in preglednici 5.

Izračun je pokazal, da med predvidenimi in končnimi preciznimi efemeridami službe IGS ni velike razlike – nekaj centimetrov v posamezni komponenti določitve položaja, medtem ko so razlike položajev GPS-satelita iz oddanih efemerid in preciznih efemerid večje (nekaj metrov) in naraščajo s starostjo podatkov oddanih efemerid (tudi do 30 m v časovnem intervalu 4 ure). Ker služba IGS predvidene precizne efemeride od leta 2001 nudi tudi do tri dni vnaprej, bi bilo dobro tudi v izvedbo GPS-izmere v realnem času (RTK-metoda) vključiti podatke preciznih efemerid. Ker je spreminjanje programske osnove v GPS-instrumentu uporabniku praktično onemogočeno, se je vsaj pred novim nakupom instrumentov za izvedbo RTK-metode GPS-izmere treba vprašati, kaj nam instrumentova programska osnova v smislu uporabe podatkov efemerid nudi.

Lahko bi rekli, da so deloma problem uporabe optimalnih podatkov GPS-efemerid v realnem času že rešili v okviru najnovejše izvedbe RTK-metode GPS-izmere s pomočjo navideznih GPS-postaj (Virtual Reference Stations - VRS). Programska oprema, s katero so opremljene GPS-službe (tudi naša služba SIGNAL), omogoča obdelavo GPS-opazovanj tudi z vnaprej pripravljenimi preciznimi efemeridami službe IGS.

4 ZAKLJUČEK

Ključ do ustrezne kakovosti položajev objektov v prostoru s tehnologijo GPS je uporaba podatkov ustrezne kakovosti v obdelavi opazovanj. Posebej občutljivo je vprašanje uporabe podatkov, ki nam določajo položaje referenčnih točk na katere se nanašajo opazovanja (GPS-sateliti). Gre za vprašanje uporabe ustreznega tipa GPS-efemerid. Operativno delovanje tehnologije GPS v realnem času in naknadno so najprej rešili z oddanimi efemeridami, ki jih določajo na osnovi opazovanj na petih kontrolnih postajah ter z izračunov podatkov efemerid v naprej. Kmalu pa se je izkazalo, da zahtevana natančnost določitve položajev objektov na Zemlji z uporabo oddanih efemerid ni najboljša, zato nekateri centri GPS-služb iz že opravljenih GPS-opazovanj naknadno računajo položaje GPS-satelitov za nazaj. Te podatke (precizne efemeride) uporabniki s pridom uporabljamo v primeru naknadne obdelave GPS-opazovanj.

Izvedba GPS-izmere v realnem času (RTK-metoda) pa v večini primerov še vedno sloni na uporabi podatkov oddanih efemerid, pri čemer se izračunani položaji GPS-satelita s starostjo podatkov slabšajo. Po štirih urah lahko odstopanja položajev GPS-satelitov od pravih znašajo tudi nekaj deset metrov. Ko so GPS-službe v nekajletnem kontinuiranem spremljanju vplivov na GPS-satelite pridobile dovolj informacij, da lahko iz GPS-opazovanj na približno 200 stalnih GPS-postajah podatke za izračun položajev GPS-satelitov pripravijo tudi vnaprej, se je pojavila možnost izboljšave rezultatov izmere v realnem času. Izboljšava temelji na obdelavi GPS-opazovanj v realnem času z uporabo najhitrejših preciznih efemerid, ki jih služba IGS pripravlja in ponuja preko spleta za tri dni vnaprej.

Uporabnik GPS-tehnologije nima strogega vpogleda v kakovost rezultatov obdelave oddanih efemerid. Zato smo predstavili potek izračuna, izračun na konkretnem primeru in rezultate primerjali z bolj natančnimi podatki preciznih efemerid službe IGS z namenom, da bi dobili boljši vpogled v probleme uporabe oddanih efemerid in hkrati omenili možnost rešitve te problematike.

Literatura in viri:

Hawking, S. (2002). Vesolje v orehovi lupini. Učila International, založba, d. o. o.

IAG (1995). Fundamental constants (SFCE). Report of IAG Special Commssion SC3. XXI IAG General Assembly, 1995.

Strang, G., Borre, K. (1997). Linear algebra, geodesy and GPS. Wellesley-Cambridge Press.

Zebhauser (1999). Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode; GPSLAB Toolbox. Astronomische und Physikalische Geodäsie, München.

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

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

E-pošta: ppavlovc@fgg.uni-lj.si, tel.: (01) 4768 631

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

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

E-pošta: bstopar@fgg.uni-lj.si, tel.: (01) 4768 638

Prispelo v objavo: 9. april 2004