

# GPS – ANALIZA MJERNIH POGREŠAKA I PRIMJENE

## *GPS – Analysis of Measurement Errors and Applications*

Ivan Ivušić

Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
Sveučilište u Dubrovniku  
ivan.ivusic@gmail.com

prof. dr. sc. Vedran Batoš

Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
Sveučilište u Dubrovniku  
vedran.batos@unidu.hr

dr. sc. Mario Miličević, v. pred

Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
Sveučilište u Dubrovniku  
mario.milicevic@unidu.hr

UDK 656:528.28

### Sažetak

*U ovom članku analiziraju se mjerne pogreške uzrokovane različitim čimbenicima i tehnološka načela GPS-a (Global Positioning System). Do pogrešnih podataka dolazi zbog pogrešaka u satovima, smetnja zbog prolaska signala kroz atmosferu, relativističkih uzroka, geometrije i orbite satelita te refleksije signala. Prikazana su rješenja tih problema, tj. metode kojima se pogreške nastoje eliminirati. Na temelju analiziranih podataka predložen je novi postupak korištenja razrađenim modelom pri izradi rasporeda vožnje u svim vrstama prijevoza – od morskoga do cestovnog, uz minimizaciju pogrešaka.*

*Ključne riječi: GPS, pogreške mjerenja, SA, programska oprema, vozni red, karta, prijevoz.*

### Summary

*This article analyses measuring errors caused by various factors, as well as technology of GPS. Incorrect data occur as of errors in clocks, disturbances while signal travels through atmosphere, relativistic causes, geometry and orbits of satellites and reflection of signals. Solutions of these problems and the elimination methods are mentioned. Based on the analyzed data, the new process of utilization is proposed, applied in transportation timetable design, with successful implementation of the error minimization.*

*Key words: GPS, measurement errors, SA, software applications, timetable, map, transportation*

### UVOD / Introduction

Čovjeku je oduvijek orijentacija bila iznimno važna. U prošlosti se pokušavalo snaći u prostoru na razne načine – polazeći od zvijezde Sjevernjače preko mnogih inačica kompasa, koji su tek okvirno odavali naše mjesto u prostoru. Danas imamo mogućnost znati našu poziciju s iznimnom točnošću. U idealnim uvjetima i uz najnoviju tehnologiju pogreška se može mjeriti tek u

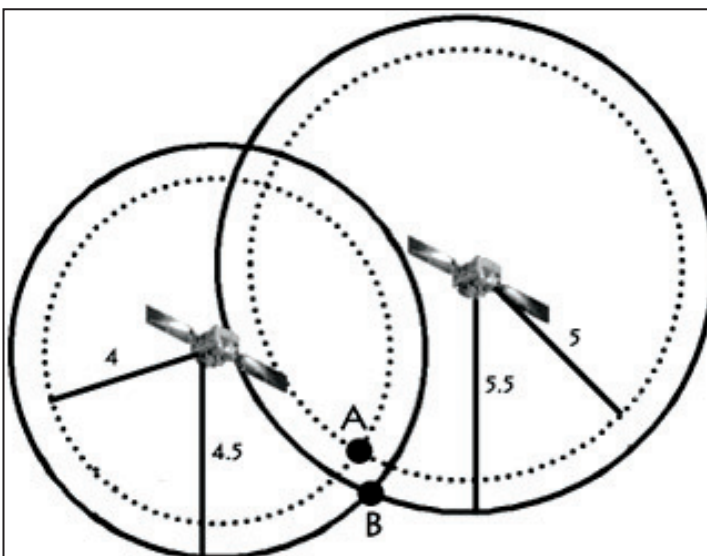
desecima centimetara. GPS je danas najrašireniji oblik navigacije. Takvi su uređaji u brodovima, zrakoplovima, automobilima... Softver takva uređaja prilagođen je svrsi kojoj služi.

Sustav za globalno pozicioniranje (GPS) je navigacijski sustav koji po prvotnoj ideji čine 24 satelita (danas ih ima nešto više) s pripadajućim kontrolnim

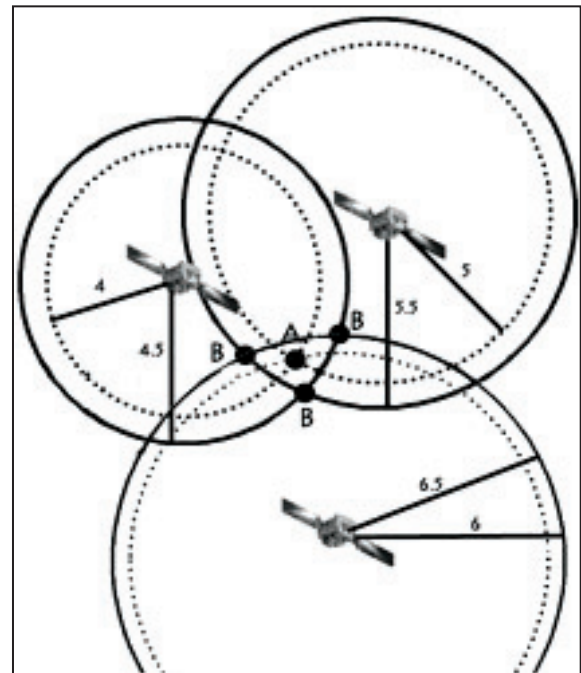
točkama na Zemlji [1]. Iznad svake točke na Zemlji u svakom trenutku trebaju biti dostupna četiri satelita. Tu se dolazi do prvog većeg izazova, a to je izračun putanja 24 satelita da se ispuni spomenuti zahtjev. Sateliti rotiraju [2] oko Zemlje brzinom od 3,9 km/s na prosječnoj udaljenosti od središta Zemlje od 26.560 km. S obzirom na to da je radijus našeg planeta 6.360 km, znači da su sateliti udaljeni prosječno 20.200 km, što ih svrstava u srednje udaljene. Svojevremeno je točnost za civilnu uporabu bila ograničena takozvanom SA (*Selective Availability*) mjerom; ona je ukinuta 5. svibnja 2000. To je bila zaštitna mjera kojom se namjerno narušavala točnost pozicija satelita pa je pogreška vremena također bila ugrađena u L1 signal satelita. Pogreške su znale iznositi i do 150 m. Danas je to redovito unutar 20 m, pa i puno manje. Uz poboljšanja kao što je diferencijalni GPS i WAAS/EGNOS (*Wide Area Augmentation System / European Geostationary Navigation Overlay Service*) [3], pogreška se može znatno smanjiti.

### IZRAČUNAVANJE POZICIJE / *Position Calculation*

Dosta je pojednostavnjen postupak: satelit šalje signal u kojemu kaže: ja sam satelit X, nalazim se na poziciji Y i vrijeme je Z. S obzirom na svoj položaj satelit šalje podatke o ostalim satelitima. Da bi odredio udaljenost [4], prijamnik uspoređuje vrijeme kad je signal poslan s vremenom kad je primljen. Tu nailazimo na problem preciznosti sata unutar samog GPS uređaja [5]. S obzirom na to da se u satelitima nalaze atomski satovi iznimne točnosti, a u samom je uređaju običan kvarcni sat, dolazimo do problema sinkronizacije satova. O rješenju toga nešto kasnije.



Slika 1. Izračun pozicije s dva satelita  
*Figure 1. Calculating position with two satellites*



Slika 2. Ispravak sata u uređajima s pomoću trećega satelita

*Figure 2. Clock correction with third satellite*

Da bi se odredila točna pozicija prijamnika, potrebna su tri satelita. To vrijedi za dvodimenzionalnu točku jer bez dodatnoga satelita nije moguće odrediti komponentu visine. Dakle, pretpostavka je da se točka nalazi na Zemljinoj površini. Nakon što se odredi udaljenost od prvoga satelita, dobiva se kružnica na kojoj se nalazi točna pozicija. S drugim se satelitom dobiva presjek dviju kružnica i dvije točke u prostoru. Budući da je jedna od tih dviju točaka redovito duboko u svemiru ili je u unutrašnjosti Zemlje, lako se može zaključiti koja je ispravna i tako odbaciti pogrešnu. No, sad se vraćamo na problem s točnošću sata unutar samog GPS uređaja. Što ako je njegovo kašnjenje, primjerice, 0,5 s?! Onda kružnica više nije istog promjera, i točke se presjeka pomiču (slika 1.). Rješenje problema leži u trećem satelitu, s pomoću kojega se dobiva presjek triju kružnica. U idealnim uvjetima morale bi se sve sjeći u točki B. No ako se ne sijeku, zna se da je pomak u satu samog uređaja. Pomicanjem vremena u uređaju približava se situaciji bez kašnjenja, i na taj način, kad se sve tri točke spoje u jednu, dobiva se ispravno vrijeme. Tada se može smatrati kao da je i u samom uređaju ugrađen sat precizan kao atomski (slika 2.) Ovaj je postupak od velike važnosti jer su atomski satovi iznimno skupi, i bilo bi dosta teško napraviti komercijalan proizvod. S druge strane, kašnjenje od samo 1/100 s uzrokuje pogrešku

od čak 3.000 km. Da bi se postigla preciznost od 10 m, potrebno je kašnjenje svesti na 0,00000003 s, što je nemoguće očekivati od uobičajenih satova.

### GPS SIGNALI / GPS Signals

Za prenošenje podataka potrebna je odgovarajuća frekvencija nositelja. Ovo su neki od zahtjeva koji se moraju ispunjavati:

- biti ispod 2 Ghz da ne bi trebala antena na prijamnicima,
- biti između 100 MHz i 10 GHz jer su kašnjenja u ionosferi iznimno velika za signale izvan tog raspona,
- poželjno je da frekvencija bude što viša jer su odstupanja brzine signala od brzine svjetlosti veća što je frekvencija niža. Također je viša frekvencija bolja poradi velike protočnosti podataka.

Ako se zna da se u satelitima nalaze atomski satovi, koji su iznimno precizni, zašto onda treba ispravak vremena?!

S obzirom na to da satovi nisu međusobno sinkronizirani, mogu se uvidjeti određene neispravnosti u radu samog satelita te ga privremeno označiti nestabilnim. Prijamnici ga tada ne bi trebali uzimati u obzir za svoje izračune, ako imaju korektan softver. Nakon što se podaci spremaju u GPS uređaju, o njihovoj starosti ovisi koliko će vremena biti potrebno da nakon izvjesnog prekida u radu pozicija ponovno bude izračunata. Prvi je slučaj takozvani „hot start“, do kojega dolazi ako se uređaj ponovno aktivira nakon 2-6 sati na istoj poziciji na kojoj je posljednji put izvršen izračun. U tom slučaju potrebno je 15 s za lociranje. Drugi je slučaj kad su podaci astronomskog kalendara zastarjeli. To zovemo „warm start“, i događa se kad se pojave novi sateliti s kojih prijamnik prima signal. Proces otprilike traje 45 s, no produljuje se sa svakim novim satelitom



Slika 3. GPS signal  
Figure 3. GPS signal

S obzirom na navedene zahtjeve, civilni GPS uređaji koriste se L1 frekvencijom na 1.575,42 MHz.

Sateliti prijamnici prepoznaju po PRN-u (*Pseudo Random Number*). Iako je na početku planirana mreža od samo 24 satelita, danas ih je više poradi sigurnosti, točnosti i pouzdanosti sustava.

Signal sadržava informacije kao što su putanje satelita, ispravak vremena i drugi sustavni parametri povezani sa stanjem satelita. Kompletan signal sastoji se od 37.500 bitova uz prijenos od 50 bit/s. Potrebno je, znači, 12,5 min za prijenos ukupnog signala. To je vrijeme potrebno da bi se obavio prvi izračun pozicije. Sam signal podijeljen je u 25 okvira, svaki s po 1.500 bitova (vrijeme prijenosa svakog okvira je 30 s). Tih 25 okvira podijeljeno je u podokvire (300 bitova) a oni opet u 10 riječi (30 bitova – 0,6 s za prijenos), (slika 3.). Prva riječ je TLM (*Telemetry Word*) i ona sadržava informacije o starosti podataka. Sljedeća je HOW (*Hand Over Word*), koja sadržava vrijeme prošlo od prošlog resetiranja GPS vremena (0:00 h s posljednje nedjelje na ponedjeljak). Ostatak prvog podokvira sadržava podatke o statusu odašiljućeg satelita i ispravak vremena. Drugi i treći podokvir imaju podatke astronomskog kalendara (efemera), a četvrti i peti podatke o ostalim satelitima.

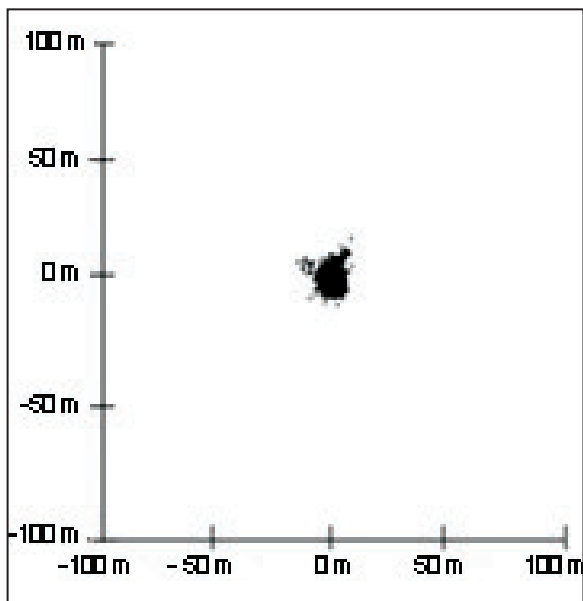
u dometu. Treći je slučaj tzv. cold start, koji se događa kad su zastarjeli i podaci astronomskog kalendara i podaci dnevnika. Onda proces može potrajati i do 12,5 min dok prijamnik primi sve podatke.

### POGREŠKE / Errors

#### SA (*Selective Availability*)

Čimbenik koji je imao najviše utjecaja na pogrešku GPS-a više nije aktivan. Naime, 5. svibnja 2000. ukinut je SA. To je bila umjetno stvorena pogreška u L1 signalu. Za civilne prijamnike to je značilo dosta manju točnost. Također, podaci su se efemera slali s lošijom preciznošću, što je značilo da dobivena pozicija satelita nije u potpunosti odgovarala stvarnoj. Razlozi uvođenju ove restrikcije bili su sigurnosne prirode. Zanimljivo je, zbog toga, što je SA bio privremeno ukinut 1990. za vrijeme Zaljevskog rata jer Amerikanci nisu imali dostatno vojnih uređaja, pa su morali nabaviti 10.000 civilnih.

Slike 4. i 5. pokazuju kako se razlikuje preciznost prije i poslije ukidanja SA. S aktivnim SA 95% svih točaka je u radijusu od 45 m, dok nakon njegova deaktiviranja 95% ih upada unutar radijusa od 6,3 m.

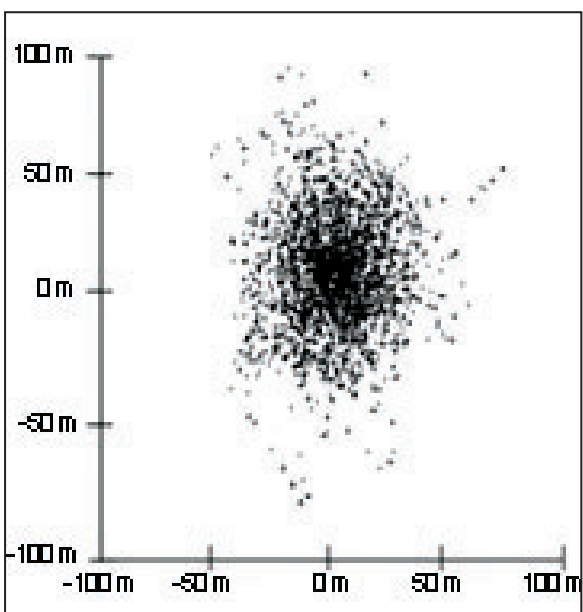


Slika 4. Primjer pogreške sa SA i bez nje  
Figure 4. Error sample with and without SA

#### Geometrija satelita / Geometry of a Satellite

Pojednostavnjeno, geometrija satelita opisuje poziciju satelita jednoga prema drugome u odnosu prema prijammniku. Ako prijammnik, na primjer, vidi 4 satelita i svi su na sjeverozapadu, onda dolazi do pogreške (100 - 150 m), pa čak i do toga da je poziciju nemoguće odrediti (slika 6.).

To se najbolje može vidjeti iz priloženih slika. Tamnije označeno područje, koje obilježava poziciju prijammnika, puno je veće u drugom slučaju, iz čega se jasno vidi da je mjesta za pogrešku puno više.



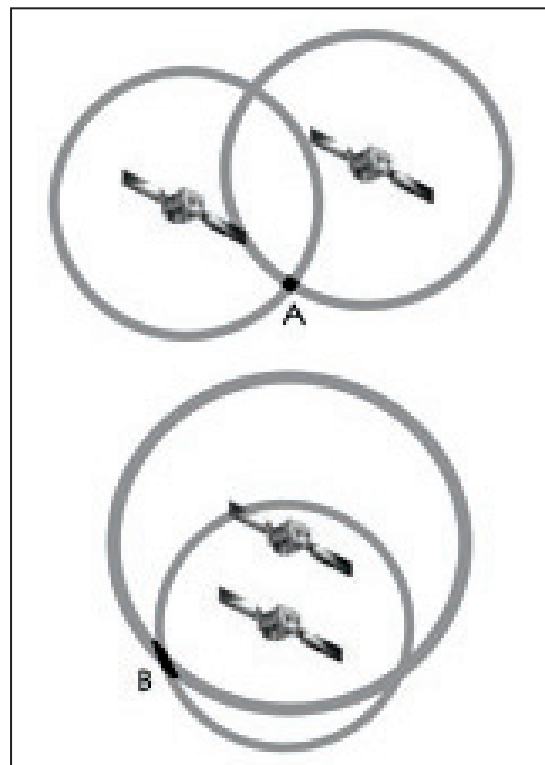
Slika 5. Geometrija satelita  
Figure 5. Satellite geometry

#### Orbite satelita / Orbits of a Satellite

Iako su sateliti pozicionirani u vrlo strogo definiranim orbitama, zbog gravitacijskih sila mogući su maleni pomaci. Podaci o orbiti redovito se kontroliraju i ispravljaju pa se GPS prijammnicima šalju unutar podataka efemera. Zbog toga ova stavka ne utječe pretjerano na pogrešku - maksimalno do 2 m.

#### Pogreške zbog refleksije / Errors Due to Reflection

Do ove pogreške dolazi uglavnom u okruženju velikih građevina. Reflektiranom signalu treba duže nego direktnome da dođe do prijammnika, zbog čega se pojavljuje pogreška u granicama od nekoliko metara.



Slika 6. Refleksija signala  
Figure 6. Signal reflection

#### Utjecaj atmosfere / Impact of a Atmosphere

Signal se usporava unutar troposfere i ionosfere. U ionosferi na visini od 80-400 km Sunce ionizirajućim zračenjem formira puno elektrona i pozitivnih naboja. Tu se zraka signala lomi, što uzrokuje duže vrijeme prolaska. No već je utvrđeno kolika je pogreška za koje frekvencije, pa se ona korigira na početku izračuna. Poznato je, naime, da se elektromagnetski valovi usporavaju proporcionalno kvadratu njihove frekvencije kad prolaze ionosferom ( $1/f^2$ ). Razlog pogrešci u troposferi jest lom zraka zbog vodene pare uzrokovane vremenskim uvjetima. Iako ima manji utjecaj na



pogrešku od ionosfere, i ovaj se ne možemo zanemariti. Nažalost, ne može se niti uključiti u izračune, već samo aproksimirati s pomoću generalnog modela.

### Neispravnost zbog vremena / *Errors Due to Time*

Iako se satovi prijmnika sinkroniziraju s onima u satelitima, ipak dolazi do malih odstupanja, što uzrokuje pogrešku od 2 m. Također, pogreška samih izračuna u prijmniku i zaokruživanja iznosi otprilike 1m.

### Relativistički uzroci / *Relativistic Samples*

Kao što se zna, vrijeme je relativno. Za GPS sustave potrebna je točnost od 20-30 nanosekunda. Zbog toga, brzo gibanje (12.000 km/h) samih satelita mora se uzeti u obzir. Po teoriji relativnosti razlike u vremenu na Zemlji i na satelitima jest 7,2 mikrosekunde na dan. Nadalje, ista teorija kaže da vrijeme teče sporije što je jače gravitacijsko polje. Dakle, na satelitima bi vrijeme trebalo teći brže. Drugi efekt ima veći utjecaj od prvoga, pa u konačnici vrijeme na satelitima teče brže. To može dovesti do pogreške od čak 10 km po danu. Da bi se ona potpuno otklonila, satovi satelita namješteni su na frekvenciju 10,22999995453 MHz umjesto 10,23 MHz, te je time potpuno uklonjen ovaj relativistički utjecaj.

Sljedeća tablica pokazuje sve utjecaje na pogrešku:

Čimbenik	Pogreška
Ionosfera	+/- 5 m
Pomaci satelitskih orbita	+/- 2,5 m
Pogreške zbog refleksije signala	+/- 1 m
Prolazak kroz troposferu	+/- 0,5 m
Izračuni i zaokruživanje	+/- 1 m
Pogreške satelitskih satova	+/- 2 m

To u zbroju iznosi 15-ak m. Za vrijeme dok je SA bila aktivna, pogreška je iznosila +/- 100 m. Danas, WAAS/EGNOS umanjuju iznos pogreške baveći se prvenstveno proračunima prolaska kroz ionosferu, ali također i putanjama i pogreškama satova; ukupnu pogrešku smanjuju do +/- 3-5 m.

### ISKORISTIVOST GPS-A U PRIJEVOZU / *Use of GPS in Transport*

Ideja bi bila zamijeniti postojeće vozne redove grafičkim kartama koje dobivaju podatke o trenutnoj poziciji prijevoznog sredstva preko GPS-a. Vozila bi imala svoje oznake tako da se jasno dade zaključiti o kojemu se vozilu radi ako je više njih unutar područja koje ta karta prikazuje. Ako ih ne bi bilo moguće tekstualno označiti, trebalo bi uz kartu navesti legendu koja pojašnjava oznake. Karta bi također sadržavala dio s numeričkim

podacima. Na temelju brzine kretanja i informacija iz baze podataka, određivalo bi se vrijeme dolaska na svaku postaju. Ukupni put vozila dijeli se na intervale. Za svako prijevozno sredstvo brzina kretanja bi se određivala u kombinaciji prosječne brzine u zadnjem intervalu (određuju se s obzirom na dužinu puta), s prosječnom brzinom na tom intervalu spremljenoj u bazi podataka za dotično vozilo. Na taj način moglo bi se dobiti okvirno vrijeme u kojemu bi se vozilo trebalo pojaviti na sljedećim postajama. Ta bi pretpostavka trebala pokazati visoku razinu točnosti, osim kada dođe do nepredviđenih kvarova, vremenskih nepogoda ili slično. Razvijena programska oprema podupirala bi sve navedene postupke i obradila dostupne podatke potrebne za kvalitetnu uporabu ovakva rješenja.

Čekanje je uvijek bio najteži dio putovanja. Na ovaj način ljudima bi se pružila kvalitetnija i, što je još važnije, točnija informacija, a samo vizualno putovanje vozila na karti vjerojatno bi imalo olakotni psihološki utjecaj.

### ZAKLJUČAK / *Conclusion*

Zahvaljujući GPS sustavu pozicioniranje na Zemlji nikad nije bilo točnije. Danas se ovim uređajima koristi u najrazličitije svrhe. S obzirom na to da je na moru orijentacija jedna od najvažnijih stvari, GPS je za pomorstvo od iznimne važnosti. Softver se izrađuje s obzirom na svrhu uporabe, pa se tako za pomorstvo naglašava dubina, površinske stijene i slično. Unatoč pogreškama, podaci su primjerene točnosti i sustav je sve rasprostranjeniji. Budućnost mu nije u pitanju. Pitanje je samo do kolike točnosti će se moći doći s pomoću novih tehnologija.

U ovome radu predložen je postupak zamjene postojećih vozni redova grafički obrađenim podacima o trenutnoj poziciji prijevoznog sredstva, uz minimizaciju pogrešaka analiziranih podataka.

### LITERATURA / *References*

- [1] Elliott D. Kaplan, Christopher Hegarty : *Understanding GPS: Principles an Applications*, Second Edition, Norwood, 2006
- [2] URL : <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/>, kolovoz 2008.
- [3] URL : <http://www.kowoma.de/en/gps/>, kolovoz 2008.
- [4] URL : <http://www.trimble.com/gps/index.shtml>, kolovoz 2008
- [5] URL : <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/snap.htm>, kolovoz 2008.

Rukopis primljen: 23. 10. 2008.