

PROBLEMI TOČNOSTI DOPLEROVSKIH OPAŽANJA SATELITSKE GEODEZIJE*

K. ČOLIĆ i M. SOLARIĆ** — Zagreb

1. UVODNE NAPOMENE

Ukoliko se žele pobliže promotriti sadašnje mogućnosti doplerovskih postupaka satelitske geodezije posebnu pažnju zaslužuju dva glavna činioca, koji utječu na njihovu dostupnu točnost, a to su:

- a) izvori pogrešaka i mogućnosti smanjenja njihovih djelovanja,
- b) različitost doplerovskih postupaka odnosno rješenja u primjeni.

Ta je problematika upravo obrađena u ovom članku, s time da se prethodno analizira u kratkim crtama odnos između operabilnih i preciznih efemerida, dok su drugi osnovni aspekti, koji su općenito vezani za realizaciju doplerovskih opažanja, ostali predmetom idućeg članka (instrumenti, software-ska podrška i praktični rad).

U namjeri da se ova nova materija prezentira u cijelosti na način blizak što širem krugu geodetskih stručnjaka u nas poduzeto je dopustljivo pojednostavljenje, odnosno reduciranje u izlaganju teoretskih pojedinosti, pa je u oba ta članka izostavljen uglavnom komplicirani jezik matematičkih formula. Na taj način se zbog ograničenog prostora našlo ipak dovoljno mjesta za najbitnije elemente, a poduzeta njihova analiza sasvim omogućava — zajedno s materijom obrađenom u prethodnom i idućem članku istih autora — da se dobro sagledaju ne samo specifični karakter i osnovni problemi doplerovske tehnologije, nego da se jasno ukaže na svu neophodnu serioznost u njenom svrsishodnom ostvarivanju.

Ipak za pravilno uvođenje doplerovskih mjerenja satelitske geodezije na jugoslavenskom teritoriju, ponajprije radi njihove temeljne primjene u osnovnim geodetskim radovima, napose u svrhu ispitivanja zahvaćenog dijela plohe geoida, kao i za predloženo uspostavljanje tzv. geodetske mreže nultog reda SFRJ, nužna su i dodatna razjašnjenja. Ona su se pokazala doista korisnim

* Predmetna razmatranja su čvrsto povezana s člankom (Solarić, Čolić 1981), koji je objavljen u prošlom broju 4—6 ovog istog časopisa. Inače i ovaj rad pripada znanstveno-istraživačkoj temi (A2.4) »Regionalno istraživanje oblika i disanja (plimnih valova) Zemlje«, koju financira Republička samoupravna interesna zajednica (odnosno SIZ III) za znanstveni rad SR Hrvatske.

** Adresa autora: prof. dr ing. Krešimir Čolić i prof. dr ing. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26.

istraživačkim radom, a iz razumljivih razloga autori tu interesantnu problematiku posebno obrađuju u završnom članku.

2. USPOREDBA OPERABILNIH I PRECIZNIH EFEMERIDA

Osnovne karakteristike operabilnih efemerida, što ih svaki satelit tipa TRANSIT stalno emitira putem radio-signala, iz kojih se onda izračunaju njihove geocentričke koordinate, razmotrene su u članku (Solarić, Čolić 1981), a u njemu je ukazano i na drugačiju prirodu nastanka tzv. preciznih efemerida. Zbog toga se sada može prezentirati kratki osvrt na razlike između te dvije vrste efemerida.

U prvom redu operabilne i precizne efemeride se razlikuju po svojoj točnosti, što nam najbolje ilustrira tabela 2.1.

Tabela 2.1 Točnost određivanja položaja satelita operabilnim odnosno preciznim efemeridama.

Netočnost za →	operabilne efemeride	precizne efemeride
u smjeru putanje	± 25 . . . 26 m	± 1,5 m
radijalno	± 5 . . . 8 m	± 0,6 m
okomito na ravninu putanje	± 10 . . . 17 m	± 1,5 m

Na temelju ovih iskustvenih vrijednosti proizlazi da su precizne efemeride čak oko 10 puta točnije, što je posljedica činjenice da se one kasnije posebno izračunaju na bazi stvarnih opažanja izvjesnih dijelova putanja za najviše 2 odabrana satelita TRANSIT, pa se u postupku izjednačenja izvodi relativno sigurna interpolacija. Osim toga za precizne efemeride se pretpostavlja (Anderle 1976) da se odnose sa preciznošću od ±1 m na »istiniti geocentar« (centar Zemljinih masa). Kod operabilnih efemerida radi se o predikciji (prethodnom prognoziranju) putanja TRANSIT satelita uz pomoć ranijih opažanja, pa se izvodi ekstrapolacija na osnovu usvojenog modela Zemljinog gravitacijskog polja.

U drugom redu, kao što je u (Solarić, Čolić 1981) rečeno, operabilnim (»broadcast«) efemeridama određen je položaj satelita u Svjetskom koordinatnom sustavu WGS 72, a preciznim efemeridama u »NWL-9 D« referentnom sustavu. Zbog tog razloga moraju se geocentričke koordinate stanica određene operabilnim efemeridama razlikovati od koordinata iste stanice izračunatih preciznim efemeridama. Za prijelaz iz »datuma 1« u »datum 2« koriste se jednadžbe:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{1-2} + (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & -\Theta_z & \Theta_y \\ \Theta_z & 1 & -\Theta_x \\ -\Theta_y & \Theta_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 \quad (2 - 1)$$

gdje su $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — koordinate razlike između geocentra u »datumu 1« i »datumu 2«, $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$ — kutovi rotacije sistema oko osi X, Y, Z, a m razlika njihove

vih mjerila. Ovih 7 transformacijskih parametara za prijelaz sa koordinata stanica određenih operabilnim efemeridama na koordinate tih stanica određenih preciznim efemeridama odredili su Jenkins i Leroy (1979) iz opažanja na 54 stanice raspoređenih po čitavoj Zemlji i iznose:

$$\begin{aligned} \Delta X &= (-0,8 \pm 0,5) \text{ m}, & \Delta Y &= (0,2 \pm 0,5) \text{ m}, & \Delta Z &= (-2,6 \pm 0,5) \text{ m} \\ \Theta_x &= (-2,3 \pm 1,2) \cdot 10^{-7} \text{ rad}, & \Theta_y &= (0,9 \pm 1,1) \cdot 10^{-7} \text{ rad}, \\ \Theta_z &= (2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-7} \text{ rad}, & m &= (2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-7} \end{aligned}$$

Međutim, ove transformacijske parametre odredili su također (Boucher i dr. 1979) na osnovu polučeni rezultata za 29 stanica uključenih u Zapadno-evropsku doplerovsku opažачku kampanju EDOC-2, koji po njemu imaju ove vrijednosti:

$$\begin{aligned} \Delta X &= (-0,9 \pm 0,5) \text{ m}, & \Delta Y &= (-1,9 \pm 0,6) \text{ m}, & \Delta Z &= (-8,0 \pm 0,6) \text{ m} \\ \Theta_x &= 0, & \Theta_y &= 0, & \Theta_z &= (0,10 \pm 0,03)'' \\ m &= (-4,04 \pm 0,55) \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Odmah se uočava da ove vrijednosti, koje vrijede isključivo za zahvaćeno područje Evrope, osjetno diferiraju od prvo navedenih transformacijskih parametara.

Naravno, u praktičnoj primjeni doplerovskih opažanja, npr. u povezivanju tzv. satelitskih mreža s postojećim geodetskim položajnim mrežama, vidi (Adam i dr. 1979) itd., pojavit će se potreba prijelaza s doplerovskog geocentričkog sustava na odgovarajući »geodetski datum«, koji je usvojen u pojedinoj zemlji ili grupi zemalja. (O povezivanju »datuma« riječ je također u (Čolić 1979). Za jugoslavenski Bessel-ov sustav dobile bi se iz poznatih razloga sasvim drugačije vrijednosti transformacijskih parametara.

U idućem poglavlju razmotrit će se osnovna pitanja točnosti kod primjene operabilnih efemerida, jer one dolaze u obzir prilikom uvođenja doplerovskih mjerenja na teritorij SFRJ, a i ukazat će se na razlike u odnosu prema primjeni preciznih efemerida.

3. IZVORI POGREŠAKA I MOGUĆNOSTI SMANJENJA NJIHOVIH UTJECAJA

Kao i u većini empiričkih mjerenja unutar geodezije tako i u doplerovskim mjerenjima, premda su izrazito specifične prirode, postoje tri osnovna područja izvora pogrešnosti (Seeber 1978). P r v o su tu neizbježne nesigurnosti u prethodnom izračunavanju efemerida, tj. emitiranih parametara putanje satelita, zbog čega se u pravilu pojavljuju izvjesna odstupanja od njihovih realnih vrijednosti u trenucima odašiljanja poruka (»opažani« položaji). D r u g a grupa poremećajnih efekata napose djeluje na doplerovski pomak frekvencije, ali i na trenutke vremena u prijemu radio-signala, a izazvani su atmosferskim medijem kroz koji prolaze sa satelita emitirani radio-valovi. T r e ć a skupina nestabilnosti dovodi do pogrešaka u prijemu signala na anteni odnosno u prijemu doplerovskog mjernog uređaja u stajališnoj točki na Zemljinoj fizičkoj površini.

Iz tabele 3.1 vidi se da na točnost registracije pojedinačnih — u pravilu 15—18 minuta dugih — prolaza »opažanih« satelita značajno utječe čak 8 izvora

pogrešaka. Oni izazivaju promjene u izmjerenim vrijednostima pripadnih »dopler counta« (doplerovskih zbrojeva) kod uobičajenog korištenja — sa satelita stalno emitiranih i svim korisnicima dostupnih operabilnih (»broadcast« —) efemerida, vidi poglavlja 4. i 5. u (Solarić, Čolić 1981). Iako u umanjenoj mjeri, jer se uvijek opaža veći broj prolaza satelita, ti isti poremećajni faktori limitiraju sigurnost konačnih doplerovskih rezultata — geocentričnih koordinata odabranih točaka (stanica). Ako se za njih želi ipak postići geodetski interesantnu točnost, tada se dobiveni podaci opažanja, koji su automatski registrirani na magnetske kazete, moraju naknadno korigirati, da bi se tako uklonili ili barem na zadovoljavajuću mjeru smanjili utjecaji svih izvora pogrešaka. Taj se neophodni zahvat ostvaruje dobrim dijelom tako da se u numeričkoj obradi podataka koristi dosta složena modelna predodžba, koja se po mogućnosti što više približava situaciji u fizikalnoj stvarnosti. Daljnje nužno povišenje točnosti postiže se primjenom pogodnih postupaka doplerovskih opažanja (vidi iduće poglavlje). Stoga je ovdje mjesto da se поближе razmotri kakova je zasad situacija po pojedinim izvorima pogrešaka prema tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Vrste pogrešaka i njihov utjecaj na točnost pri pojedinačnom prolazu satelita, prema (Black i dr. 1975) odnosno (Seeber 1980).

Vrste pogrešaka prema izvoru	Iznosi djelovanja
1. Pogreške efemerida satelita: a) nesigurnost modela WGS-72 b) zaokruživanje iznosa efemerida c) neobuhvaćeni dio površinskih sila	$\pm 5-10$ m ± 5 m $\pm 10-25$ m
2. Pogreške od atmosferskog medija d) jonosferska refrakcija (samo 3 reda) e) zanemareni troposferski efekti	$\pm 1-5$ m
3. Pogreške u prijemnom uređaju f) varijacije faznog centra antene g) »time jitter« (varijacija vremena) h) nestabilnost oscilatora prijemnika	$\pm 1-6$ m
Ukupna moguća pogreška (maksimalno):	$\pm 12-28$ m

3.1. Pogreške efemerida satelita

a) Nesigurnost modela WGS-72 za Zemljino polje gravitacije: Gotovo najveće pogreške od ± 5 m, pa čak do dvostruko većeg iznosa, u izračunavanju efemerida satelita za pojedine prolaze (pozicije emitiranja) proizlaze iz nesigurnosti sadašnjeg modela WGS-72 (kao i NWL-9D, jer se malo razlikuju) za Zemljino polje gravitacije.¹ Te nesigurnosti su najvećim dijelom uklo-

¹ U numeričkom tretmanu gibanja Zemljinih umjetnih satelita ne uzima se u obzir centrifugalna sila koja djeluje na površini Zemlje.

njene kada se primjenjuju tzv. precizne efemeride, vidi (Solarić, Čolić 1981). Za općenito dostupne operabilne (»broadcast« —) efemeride bilo bi moguće smanjiti utjecaj ovog izvora pogrešnosti tek dodatnim poboljšanjem modela Zemlje odnosno prijelazom na njezinu točniju modelnu predodžbu; u tom smislu vidi npr. (Čolić 1979). Prema nekim nagovještajima do toga će, izgleda, uskoro doći, što omogućava već postojeća velika količina novih podataka, prije svega terestričkih anomalija sile teže, kao i altimetrijskih te laserskih mjerenja u satelitskoj geodeziji.²

b) Zaokruživanje iznosa efemerida u radio-signalima:

Pogreške zaokruživanja operabilnih efemerida od maksimalno ± 5 m nastaju zato jer se — kako je već u članku (Solarić, Čolić 1981) istaknuto — varijabilni parametri putanje TRANSIT-satelita emitiraju u jedinicama od 10 metara. Izvjesno smanjenje ovog poremećajnog utjecaja postiže se opažanjem velikog broja satelita. U preciznim efemeridama ovaj je problem praktički uklonjen.

c) Neobuhvaćeni dio površinskih sila:

Ipak najveći udjel u pogrešnosti prethodnog određivanja (tzv. prediciranja) putanje satelita otpada na nepotpuno uzimanje u obzir poremećajnih sila, koje djeluju na površinu satelita i dovode do promjena u njegovom gibanju. Tu se ubraja prije svega usporavajuće djelovanje atmosfere (engl.: drag) i pritisak sunčeva zračenja uključujući i albedo (radiation pressure). Ipak, sada već postoje takvi računski modeli s kojima se ovi poremećajni efekti — zajedno s privlačnim djelovanjem Sunca i Mjeseca i dr. — puno bolje obuhvaćaju nego ranije (Hallos 1980). Raduje vijest da će se njihovi poremećajni utjecaji na predicirane geocentričke koordinate satelita moći čak desetorostruko smanjiti, tj. na iznos od svega $\pm (1,0—2,5)$ m, s predviđenim instaliranjem specijalnog rješenja, tzv. DISKOS u satelite NOVA.³ Na taj način će se ukupna moguća pogreška za pojedinačni prolaz satelita smanjiti čak za 50%. Inače sateliti NOVA donose i neka druga poboljšanja, kao što su: bolja kontrola vremena i frekvencije, pojačana snaga odašiljača i što je osobito važno programirani procesor, vidi (Hoskins 1979). Zbog svega toga djeluje sasvim uvjerljivo da će se uz pomoć složenih postupaka rada i obrade podataka s kompleksnim numeričkim modelima moći postići i očekivane točnosti od fantastičnih $\pm 0,1$ m u određivanju relativnih geocentričkih koordinata doplerovskih točaka na Zemlji.

3.2. Pogreške prouzrokovane atmosferskim medijem

Poremećajna djelovanja atmosfere na frekvenciju i vremenski interval širenja radio-valova se relativno dobro obuhvaćaju odgovarajućim modelima za jonosferu i troposferu, pa se za samo jedan prolaz satelita može očekivati pogreška od ± 1 m do maksimalno ± 5 m. Kod većeg broja akceptiranih prolaza sa-

² Tada će se opet pojaviti nužne promjene geocentričkih koordinata postojećih doplerovskih stanica na Zemljinoj površini (vjerojatno oko ± 1 m ili malo više), slično kao 1975. g. kod prijelaza sa starog modela APL 4.5 na sadašnju bolju soluciju WGS-72 (ondašnje razlike su bile čak oko ± 5 m). Za manja regionalna područja te će promjene biti manje-više konstantnih iznosa.

³ Ideja DISKOS-a (skraćena od: displacement compensation system) bazira se na specijalnoj, u satelitu postavljenoj kontrolnoj masi, koja omogućava da se ustanovi i automatski kompenzira promjena putanje satelita.

telita (obično se uzima oko 50), raspoređenih na nekoliko dana rada, mogu se ove nesigurnosti osjetno smanjiti. Osim toga malo poboljšanje donosi upotreba aktualnih meteoroloških podataka (tlak, temperatura i vlažnost zraka) na opažajkim stanicama.

d) Jonosferska refrakcija (samo 3. reda):

Utjecaj poremećajnih efekata u jonosferi (od 40 do 400 km) na izmjereni »doppler count« obično se prikazuje sumom od tri korekciona člana. Jonosferska korekcija 1. reda može se jednostavno odrediti usporedbom izmjerenih »doppler counta« N u prijemniku doplerovskog uređaja na stanici, pa formula za određivanje reduciranog »doppler counta« N' kao da su se radio valovi širili u vakuumu kroz jonosferu glasi (Seeber, Egge 1979):

$$N'_{400} = N_{400} + \frac{9}{55}(N_{400} - N_{150}) \quad (3-1)$$

Upravo radi toga se u ovoj vrsti empiričkih opažanja i koriste dvije frekvencije od cca 150 MHz i 400 MHz. S druge strane korekcionni član 2. reda je vrlo mali i može se uglavnom zanemariti, dok se za obuhvaćanje člana 3. reda uspostavljaju točnije modelne predodžbe. Općenito se uzima da nakon uračunavanja korekcionnog člana 1. reda preostaju još efekti (reziduali) manji od 1% ukupne jonosferske korekcije, i čak su više zanemarivi po noći (Decca 1978).

e) Zanemareni troposferski efekti:

Reduciran »doppler count« N'_{400} mora se još korigirati i zbog utjecaja troposfere (na visini do 40 km) po formuli (Decca 1978):

$$N_{jk} = N'_{400} + \lambda_{400}^{-1} \cdot (\Delta S_j - \Delta S_k) \quad (3-2)$$

gdje je: N_{jk} korigirani »doppler count« zbog utjecaja jonosfere i troposfere, λ_{400} valna dužina radio-valova od 400 MHz, dok indeks j stoji za početni, a k za završni trenutak mjerenja »doppler counta«. Korekciju udaljenosti S zbog utjecaja troposfere računa se po jednadžbi:

$$\Delta S = \Delta S_d + \Delta S_w \quad (3-3)$$

gdje indeks d označava da je to korekcija za suhi zrak, indeks w da je to korekcija za vlagu u zraku.

Za izračunavanje ovih članova razvijeni su različiti modeli, vidi npr. Hopfield 1969), (Yionoulis 1970), (Saastamionen 1973), (Kouba 1979) i (Black 1978). Najnoviji je od (Kouba 1979), koji za elevaciju od 3° do 90° daje maksimalna odstupanja od svega nekoliko milimetara naspram strogog modela. U tom modelu upotrebljavaju se mjerene vrijednosti za tlak, temperaturu i vlažnost zraka. Nasuprot tome model prema (Black 1978) je nešto pojednostavljen i za izračunavanje »suhog« člana ΔS_d primjenjuje prosječne vrijednosti regionalnog karaktera prema godišnjem dobu. Međutim, ni Koubin model nije osobito kompliciran. Korigirani »doppler count« N_{jk} unosi se u jednadžbe pogrešaka (3-1) napisane

u članku (Solarić, Čolić 1981), pa se nakon izjednačenja izračunaju izjednačene koordinate pojedine stanice kao i popravka za frekvenciju $d(\Delta f)^4$.

3.3. Pogreške u doplerovskom prijemnom uređaju

Kada je sa satelita emitirani radio-signal stigao do doplerovskog prijenosnog uređaja mogu se pojaviti dodatni izvori pogrešaka instrumentalnog karaktera.

Premda su ti poremećaji u pravilu pojedinačno malog iznosa, oni mogu u svom zajedničkom djelovanju izazvati nesigurnosti od najmanje ± 1 m u registraciji pojedinog prolaza satelita. Kod većeg broja opažanja to se djelovanje doduše smanjuje u rezultatima mjerenja, ali se ipak mora uzeti u obzir kod zahtjeva za povišenu točnost.

f) Varijacije faznog centra antene:

Jačina dospjelog signala (radio-vala) do antene doplerovskog mjernog uređaja neće na nekoj stajališnoj točki biti stalno ista, već ovisi od niza faktora. Međutim, na položaj tzv. faznog centra antene, na koji se zapravo odnose doplerovska mjerenja, pored jačine primljenog signala još utječe i trenutna elevacija (visina iznad horizonta) »opažanog« satelita, a naročito često neizbježne refleksije istog signala od tla i objekata, odnosno vodenih površina u okolišu stajališne točke. Varijacije faznog centra antene mogu doseći iznos od 0,2—0,3 m u smjeru njezine vertikalne (Seeber 1978); obično su ipak manje, jer se u praktičnom radu može smanjiti stupanj refleksije, a sateliti se opažaju samo u prolazima barem 10° iznad horizonta.

g) »Time jitter« (varijacije vremena):

Emitirani signal (u trenutku vremena t_j) će se nakon intervala $\Delta t'_j$ (širenja između dotičnog satelita i osmatračke stanice), koji je ovisan od faktičkog stanja u atmosferi, primiti na postavljenu antenu doplerovskog uređaja. Međutim, tada je potrebno da prispjeli radio-signal prijeđe još put od antene do jedinice za registraciju u prijemniku uređaja, gdje će konačno u trenutku vremena T_j biti zapisan na magnetsku traku u kaseti. Da se taj mali put prevali potrebno je samo djelić vremena δt_j , koji doista neće biti uvijek potpuno isti, pa će se mijenjati i ukupni iznos $\Delta t_j = \Delta t'_j + \delta t_j^5$. Ipak se pod pojmom »time jitter« vidi npr. (Seeber 1978), podrazumijevaju prije svega sitne varijacije male veličine δt_j , koje ponekad mogu dosegnuti i $50 \mu s$ (t_j . pedeset milijuntinki sekunde). Povoljnija je situacija u novijim tipovima doplerovskih uređaja, jer su sva tri proizvođača uložili napore u reduciranju ovog izvora pogrešnosti.

h) Nestabilnost oscilatora:

Od svih nesigurnosti instrumentalne prirode najmanje su one zbog nestabilnosti oscilatora u doplerovskom mjernom uređaju, pa time izazvani poremećajni utje-

⁴ U izrazu (3—10) u članku (Solarić, Čolić 1981) korektno stoji razlika $(f_s - f_0)$, ali je u jednadžbi opažanja (3—11) i uz nju vezanom objašnjenju ispuštena oznaka (nadvlaka) »—« iznad Δf ; treba stajati Δf kako bi se uočila razlika naspram simbola Δf u tamošnjem početnom izrazu (3—1).

⁵ Prema tome strogo važi: $T_j = t_j + \Delta t'_j + \delta t_j = t_j + \Delta t_j$, što je u suglasnosti s izrazom (3—2) u (Solarić, Čolić 1981.).

caji ne prelaze niti $\pm 0,1$ m. To je zbog toga što su u svim tipovima doplerovskih uređaja ugrađeni u pravilu vrlo točni oscilatori, koje karakterizira izrazita kratkotrajna stabilnost od čak oko 10^{-12} . S druge strane, njihov se dugovremenski hod (tzv. drift) može odrediti zajedno s numeričkom obradom registriranih podataka pomoću pogodnog matematičkog modela. Svakako treba naglasiti da se tim modelom za izjednačenje mogu uz neke naprijed istaknute izvore pogrešaka još obuhvatiti i drugi poremećajni utjecaji, koje se ovdje zbog ograničenog prostora nije moglo posebno razmatrati. Oni većinom ne utječu na sadašnju točnost rezultata doplerovskih opažanja, a kreću se od npr. nedovoljno obuhvaćene korelacije između pojedinih »doppler-counta« pa sve do relativističkog efekta. Svi oni se nastoje što bolje obuhvatiti, i to s namjerom da se za svaki pojedini »doppler count« (doplerovski zbroj) postigne zahtijevano razlučivanje od barem 1/100 njegove izmjerene vrijednosti (Hatch i dr. 1979).

4. POSTUPCI DOPLEROVSKIH OPAŽANJA

Na temelju upravo izloženog proizlazi da se preciznost doplerovskih opažanja u njihovoj praktičnoj primjeni najprije može i mora poboljšati upotrebom sveobuhvatnijih te zato boljih numeričkih modela za kompjutersku obradu registriranih podataka. Ipak tu postoje izvjesne granice preko kojih se, barem za sada, ne može prijeći. Štoviše, neki od najizrazitijih poremećajnih efekata, a naročito posljedice nesavršenosti modelne solucije WGS 72 za Zemljino polje gravitacije, neće se moći ukloniti niti ugradnjom DISKOS-a u satelite NOVA.

Istina, u SAD se upravo radi na novom sistemskom rješenju, tzv. GPS (Global Positioning System), koji će imati 18 satelita u putanjama oko Zemlje na visini oko 20.000 km.⁶ Taj će sistem prema predviđanjima početi potpuno funkcionirati tek 1987. godine, ali njegova precizna verzija, izgleda, neće uopće biti dostupna za civilne svrhe. Trenutno je potpuno otvoreno pitanje, kolika će se točnost moći postići s njegovim »grubim kodom«, jer o konačnim pojedinostima te jednostavnije verzije još ništa nije poznato (Seeber, Egge 1981).

Prema tome, za sada jedino postojeći sistem NNSS (Navy Navigation Satellite System) zadržat će jamačno još barem cijelo ovo desetljeće svoj veliki značaj u čitavom svijetu za praktična rješavanja vitalnih geodetskih zadataka. Iako su od početnih 6, preostala trenutno u upotrebi još 4 njegova satelita tipa TRANSIT⁷, ipak situacija nije loša, jer će znatnu pomoć pružiti dodatni sateliti tipa NOVA. Jedan je od tih novih satelita s poboljšanim karakteristikama nedavno već lansiran, te se upravo nalazi u fazi ispitivanja, dok će mu se još jedan istovrsni ubrzo pridružiti. (Pesec 1981). Svi ti sateliti i dalje će emitirati isključivo operabilne (»broadcast« —) efemerede za svoje putanje.

⁶ U stvari planirano je čak 24 takva satelita (18 dosad odobreno), pa bi zbog toga GPS u pravilu omogućavao istovremenu pojavu najmanje četiri njegova satelita iznad horizonta neke stajališne točke; tada bi uz korištenje doplerovskih opažanja i interferometrijskih mjerenja, kao i profinjenih modela za numeričku obradu podataka trebalo biti moguće postizanje čak cm-točnosti (Anderle 1979). U nas je GPS prikazan u preglednom članku (Muminagić 1980).

⁷ Nakon što se jedan od satelita TRANSIT ranije ugasio, u međuvremenu je još jedan privremeno stavljen izvan pogona zbog nastalog poklapanja s putanjom jednog drugog satelita TRANSIT.

Zbog svega navedenog očito je da će već do sada razvijeni postupci za doplerovska opažanja satelitske geodezije — na bazi primjene operabilnih i preciznih efemerida — i dalje ostati u svojoj vrijednosti. Iako se ranije u literaturi za njihovo karakteriziranje upotrebljavalo samo dva pojma: jednostanična metoda i translokacijski modus, danas se sve doplerovske postupke može, strogo uzevši, podijeliti u četiri grupe (Seeber 1980):

1. jednostanično rješenje
2. translokacijski postupak
3. višestanična metoda
4. »short arc« modeli.

Druga i treća metoda predstavljaju na neki način prijelaz između najjednostavnijeg prvog i najsloženijeg četvrtog rješenja. Da bi se potpuno uočile razlike između navedenih pristupa, a potom moglo odlučiti koju bi se metodu realizacije trebalo predložiti za svrsishodno uvođenje doplerovskih opažanja na teritoriji SFR Jugoslavije, od strane autora poduzeta je neophodna komparativna analiza svih postupaka. Ne ulazeći ovdje dublje u teoretske aspekte, zbog njihove većim dijelom veoma složene strukture, može se istaknuti slijedeće osnovne činjenice.

4.1. Jednostanično rješenje

Kao što samo ime kaže, jednostaničnim rješenjem se određuju (doplerovske) geocentričke koordinate za svaku stajališnu točku zasebno, ali tada djeluju, nažalost, svi naprijed prodiskutirani izvori pogrešaka pri primjeni operabilnih efemerida. Ipak se s uobičajenim opsegom opažanja oko 40—50 prolaza satelita može očekivati srednja pogreška koordinata od $\pm (3-5)$ metara (Seeber, Egge 1981), što je znatno manje nego u slučaju primjene jednog prolaza satelita.⁸ Još opsežnijim mjerenjem ne bi se postiglo značajnije poboljšanje točnosti, jer neki od djelujućih izvora netočnosti mogu izazvati pogreške koje su međusobno korelirane i u razdoblju od više dana (Seeber 1980). Može se ustvrditi da će izvjesna sistematika cijelog satelitskog sistema stalno egzistirati, pa odatle proizlazi i limitirana preciznost ovog jednostavnog rješenja (Pesec 1981).

Treba naglasiti da nakon procesa jednostaničnog rješenja neće proizaći upravo navedeni iznosi, već puno manje numeričke vrijednosti za srednje pogreške, ali one su isključivo mjera za »unutarnju točnost«; naprotiv, samo »vanjska točnost« je presudna za stvarnu ocjenu kvalitete određivanja geocentričkih koordinata pojedine doplerovske stanice. Princip jednostaničnog postupka shematski je prikazan u (Solarić, Čolić 1981) na slici 2.4 (presjek hiperboloida).

Međutim, primjenom preciznih efemerida u opažanju cca 40 pogodnih prolaza satelita dobiju se već i ovim jednostaničnim rješenjem mnogo manje srednje pogreške određivanja koordinata doplerovskih točaka od nekih $\pm 0,5$ m, u najgorem slučaju ipak bolje od ± 1 m. Makar je gdjekad već i takva točnost interesantna za izvjesne geodetske radove, problem je u tome da su precizne

⁸ Točnost se može donekle poboljšati ako bi se mjerenja rasporedila na nekoliko perioda (2—3) sa različitim atmosferskim (tropo- i jonosferskim) karakteristikama.

efemeride (tek u rijetkim prilikama) dostupne isključivo korisnicima u zapadnim zemljama. Budući da su za predlaganu primjenu doplerovskih opažanja satelitske geodezije na teritoriju SFRJ na stalnom raspolaganju samo operabilne efemeride, slijedi sada zaključak da u nas jednostanično rješenje ne dolazi uopće u obzir.

4.2. Translokacijski postupak

Pod pojmom »translokacijskog načina« valja shvatiti određivanje relativnih prostornih koordinata, tj. koordinatnih razlika novih doplerovskih stanica u odnosu na (bazičnu) polaznu stanicu, čije su sve tri geocentričke koordinate već ranije određene. Ako se sve susjedne stanice nalaze na relativno malim međusobnim udaljenostima od oko 200 km do maksimalno 1.000 km, i na tim točkama izvode simultana (istovremena) opažanja prolaza satelita, tada će za njih uglavnom sve pogreške efemerida (poglavlje 2.1) i veći dio pogrešaka uslijed atmosfere refrakcije (poglavlje 2.2) biti podjednakih iznosa. U tom slučaju će se preko formiranja razlika za bazičnu i svaku novu točku najvećim dijelom poništiti poremećajni utjecaj ovih glavnih izvora nesigurnosti, pa će se postići znatno veća točnost izjednačenih razlika njihovih relativnih geocentričkih koordinata, nego da su se pojedinačno za svaku novu doplerovsku stanicu određivale njihove potpune geocentričke koordinate, uz pomoć naprijed navedenog jednostaničnog pristupa (Egge, Seeber 1979).

Upravo zahvaljujući jednostavnoj osnovnoj ideji translokacijskog postupka postala je primjena operabilnih (»broadcast«-) efemerida, na sreću, interesantna i za geodetske potrebe na kopnu. Može se konstatirati da je tako s njima postignut podjednaki stupanj točnosti kao što se postiže i primjenom teško dostupnih — preciznih efemerida u jednostaničnom postupku, vidi npr. (Schlüter i dr. 1978).

Ipak se pokazuje da translokacijski postupak osigurava osjetno veću preciznost u određivanju horizontalne udaljenosti od bazične stanice do novih stanica, nego li je to slučaj u dobivenim vrijednostima za visinsku (vertikalnu) komponentu. Također će zbog osjetljivosti na smjer proizaći nešto veće nesigurnosti u međusobnom položaju novih doplerovskih stanica (Pesec 1981). Odmah će se vidjeti da to i nije jedini niti glavni razlog da se ne bi moglo založiti za korištenje jednostavne verzije ovog postupka prilikom uvođenja doplerovskih mjerenja na teritoriji SFRJ.

4.3. Višestanična metoda

U sadašnjem trenutku razvoja doplerovskih prijemnih uređaja i mogućnosti obuhvaćanja djelovanja naprijed prikazanih izvora pogrešaka, odnosno momentalne usavršenosti matematičkih modela za numeričku obradu podataka doplerovskih opažanja, proizlazi da je za široku geodetsku upotrebu najperspektivnija upravo — višestanična metoda. Ta tvrdnja se potpuno oslanja na dostupne izvore literature, u kojim se ova metoda promatra kao poboljšanje ili složenija forma translokacijskog načina.

Naime, novost višestanične metode je ostvarenje mogućnosti naknadnog korigiranja predciranane putanje satelita, i to tako da se za nju prilikom numeričke obrade podataka doplerovskih opažanja dopuštaju u pravilu dodatni stupnjevi slobode. Uvođenje ove »relaxed orbit«-e za svaki opažani satelit

dovodi, doduše, do složenijih matematičkih modela (tzv. software-ska podrška), a s time i do dužih kompjutorskih izračunavanja.

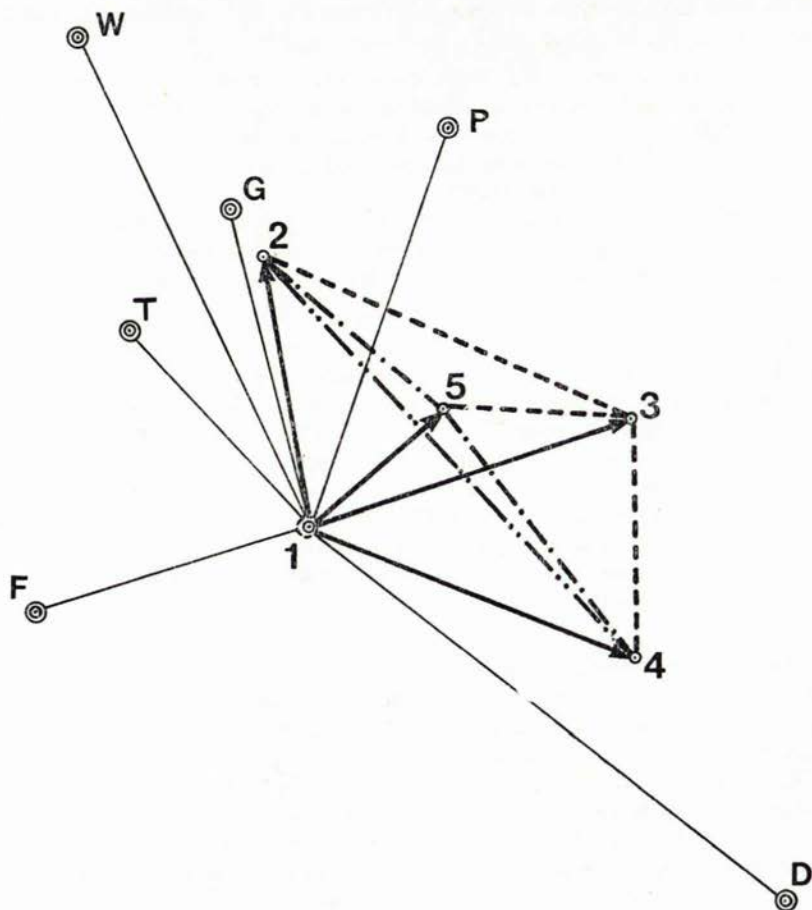
Međutim, treba uočiti da translokacijski postupak u svom osnovnom obliku zahtijeva zaista potpuno simultana opažanja, tj. egzaktno poklapanje svih upotrebljenih »doppler count-a«. Ukoliko se doplerovske stanice nalaze na srednjim i većim međusobnim udaljenostima (od oko 400 km do 1.000 km, ili čak više) ispunjenje ovog zahtjeva dovodi logično do znatnih smanjenja dužina luka putanje koji je za sve njih zajednički (Seeber 1980)⁹. Tu baš leži razlog da se u početnoj fazi uvođenja doplerovskih mjerenja unutar granica SFR Jugoslavije može zastupati samo korištenje višestanične metode.

Istina je da se ta metoda u novije vrijeme veoma efikasno primjenjuje u gotovo svim doplerovskim kampanjama u cijelom svijetu. Razlog je što ona više ne traži tako strogo ispunjavanje upravo navedenih uvjeta, a s druge strane omogućava da se već s primjenom — za sve korisnike raspoloživih — operabilnih efemerida satelita TRANSIT i NOVA mogu za nove doplerovske stanice sa zaista visokom točnošću odrediti razlike geocentričnih koordinata u odnosu na nekoliko (barem 3, ali bolje više) bazičnih stanica. Ovo se postiže zahvaljujući složenoj modelnoj predodžbi, koja se koristi u numeričkoj obradi registriranih podataka opažanja, pa zato dovodi do znatnog povećanja opsega kompjutorskih izračunavanja (ali ipak mnogo manje nego kod upotrebe »short arc« — modela, vidi slijedeći odjeljak 4.4).

Može se uzeti da će relativna koordinatna određivanja novih stanica oslanjanjem na već postojeće bazične stanice biti sada opterećena sa srednjom pogreškom do $\pm 0,6$ m za veće međusobne udaljenosti stanica, oko $\pm 0,3$ m za srednje udaljenosti, a oko $\pm 0,2$ m i čak do graničnih $\pm 0,1$ m za kraće udaljenosti između uključenih stanica (Lelgeman 1979b). Ipak, iako je ova tvrdnja vrlo čvrsta, općenito u kontroli terestričkih položajnih mreža (triangulacijsko-trilateracijskih) u pojedinim državama nema opravdanja za previše gusti raspored doplerovskih točaka, pa njihova prosječna udaljenost ne bi trebala biti osjetno manja od optimalnih 200 km (Wolf 1981). Međutim, u sinhronom uvođenju doplerovske tehnologije na jugoslavenski teritorij se, zbog objektivnih razloga (raspoloživi broj doplerovskih mjernih uređaja u geodetskim istraživačkim institucijama u Evropi, kao i postojeće doplerovske stanice u susjednim zemljama), ali i radi nezaobilaznih faktora ekonomičnosti, neće moći postaviti više od 5 osnovnih točaka, pa će njihove međusobne udaljenosti, kao i do polazišnih točaka u inozemstvu, morati dosegnuti i iznose od oko 400 kilometara, što će omogućiti ipak zadovoljavajući stupanj točnosti.

Iz poduzetih ispitivanja u tom smislu ovdje se na sl. 4.1 reproducira varijanta po kojoj bi se samo jedna točka višestaničnom metodom uključila u Evropsku doplerovsku mrežu, a na ostale četiri planirane točke na našem teritoriju poduzela bi se doplerovska opažanja translokacijskim načinom sa dva doplerovska uređaja. Pokazuje se da čvrstoća mreže ne bi bila zadovoljavajuća, jer opažanja sa svih stranica ne bi bila simultana, pa je nužno pretpostaviti da bi za svaku stranu bili različiti i parametri matematičkog modela za obradu mjerenja, a s druge strane opažanja bi trajala relativno dugo (četiri puta po jedan par točaka!).

⁹ Zbog zakrivljenosti Zemlje i međusobnog položaja stanica bit će tzv. radio-vidljivost satelita kod jednog njegovog prolaza različita za svaku od tih stanica.

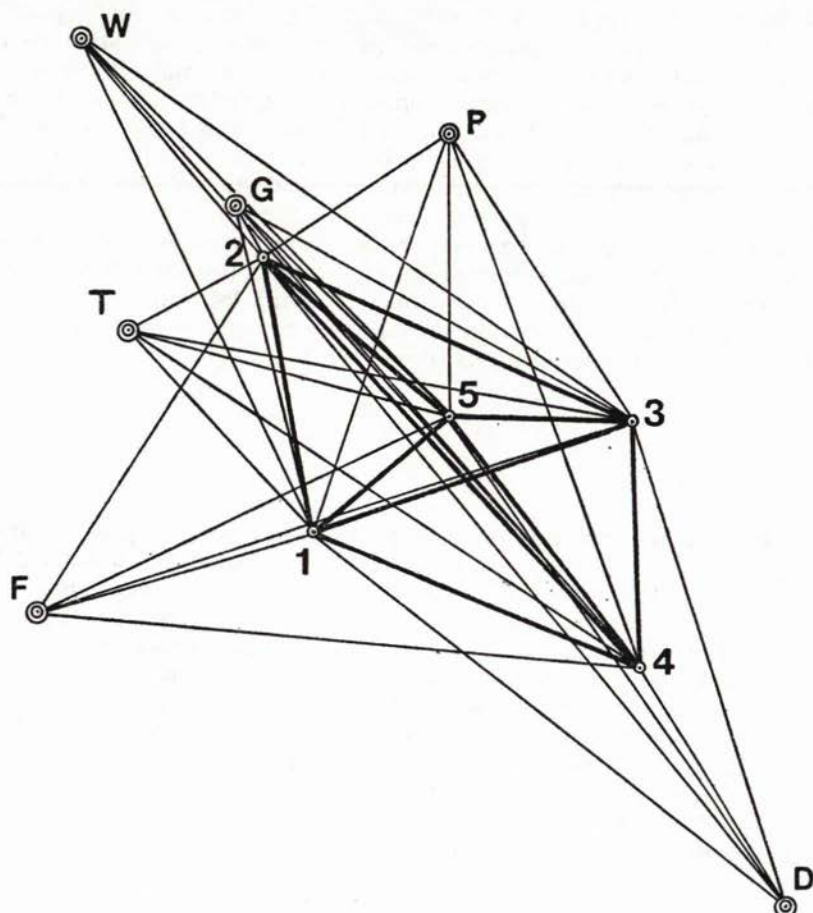


Sl. 4. 1 Određivanje geocentričkih koordinatnih razlika točka 2, 3, 4 i 5 translokacijskim načinom od točke 1 čiji je položaj određen multistaničnim postupkom.

Međutim, na sl. 4.2 odmah je prikazana, za taj isti slučaj doista snažna povezanost, koja garantira i potrebni stupanj točnosti, u istovremenom tretmanu svih 5 točaka na principu multistanične metode. Istina, tada je potrebno osigurati veći broj instrumenata, ali se cijela ta doplerovska opažачka kampanja može realizirati u veoma kratko vrijeme, tj. za svega oko 10 dana terenskih radova.

4.4. »Short arc« — modeli

Odmah treba ustvrditi da je pristup doplerovskim opažanjima uz pomoć modela »short arc« (što će reći: kratkih lukova) starijeg datuma, ali je ranije primjenjivana prvenstveno pri optičkim opažanjima satelita, pa za doplerovska opažanja još nije definitivno odgovoreno da li je ta metoda doista znatno sposobnija od upravo prikazanog multistaničnog rješenja. Prema svom konceptu ovaj način predstavlja svojevrsno usavršavanje prednje ideje i može se ukratko



Sl. 4.2 Istovremeno određivanje geocentričkih koordinatnih razlika točaka 1, 2, 3, 4 i 5 višestaničnim načinom

ovako okarakterizirati: relativno mali lukovi putanja satelita se u numeričkom procesu određivanja redukcija za vrijeme matematičke obrade podataka doplerovskih opažanja ipak nanovo izračunavaju i čine značajni dio ukupno proizašlog rješenja. Budući da ti lukovi putanje obično iznose tek oko 1/6 jednog cijelog ophoda satelita, zahtjeve za visoku točnost mogu zadovoljiti i relativno jednostavne modelne predodžbe za poremećajne efekte s oko 50 parametara. Svejedno to vodi do dosta složenih i dugotrajnih kompjuterskih izračunavanja (vidi npr. Leigemann 1979a), za koje je neophodno da se raspolaže s brzim elektroničkim računskim sistemom velikog kapaciteta memorije. Za uzvrat su osobito radovale prve vijesti o mogućnostima postizanja fantastične točnosti određivanja geocentričkih koordinata doplerovskih stanica od čak $\pm 0,1$ m. A svi geodetski stručnjaci dobro znaju što to znači postići sigurnost od ± 10 centimetara u određivanju sve tri prostorne koordinate terestričkih točaka, a pogotovo kad su te točke na takvim međusobnim udaljenostima kakve su općenito u svim zahvatima s doplerovskim mjerenjima uz pomoć Zemljinih umjetnih satelita.

Međutim, ista takva točnost od oko $\pm 0,1$ m danas se može postići i sa višestaničnim načinom, uz pažljivi rad (Kouba 1980), a uz ostalo će biti od velike koristi zajednička predkalibracija i postkalibracija svih doplerovskih mjernih uređaja uključenih u neku »doplerovsku opažačku kampanju«. S druge strane najnovija iskustva pokazuju da bi upotreba »short arc« — modela trebala dovesti vjerojatno do povećane preciznosti u koordinatnom određivanju globalno raspoređenih doplerovskih stanica na dosta velikim udaljenostima. Nasuprot tome se može na bazi tek učinjenih pokusnih izračunavanja, izgleda, ustvrditi da se kod regionalnog rasporeda točaka (primjer: veći dio zapadne i centralne Evrope) na uglavnom srednjim i malim (relativno!) udaljenostima dobiju potpuno isti rezultati i podjednaki stupanj točnosti s primjerom tzv. semi-short-arc metode (Lelgemann 1979a) kao i pomoću — ipak osjetno jednostavnijeg — višestaničnog postupka (Pesec 1981).

5. ZAKLJUČAK

U zaključku se može reći da su obje posljednje metode predestinirane za postizanje za sada najviše moguće sigurnosti u određivanju (relativnih) geocentričkih koordinata odabranih terestričkih točaka, zapravo onog stupnja točnosti kakav će morati biti prilikom svrsishodnog uvođenja doplerovskih opažanja na čitavo područje SFR Jugoslavije. U tu svrhu ipak bi trebalo zasad dati prednost korištenju višestaničnog postupka sa svim postojećim prednostima pri primjeni operabilnih efemerida. Međutim, valjalo bi računati i s kasnijom upotrebom kompliciranijeg načina sa »short arc«-modelima. To će onda predstavljati ne samo neophodnu kontrolu, već i dokaz postignute vanjske točnosti u cijelom početnom zahvatu uspostavljanja doplerovske tehnologije satelitske geodezije na jugoslavenskom teritoriju odnosno za kvalitetu tzv. geodetske mreže nultog reda SFRJ, o kojoj će biti više riječi u jednom od iduća dva članka istih autora.

LITERATURA

Ovdje su uz izvore literature navedene u članku (Solarić, Čolić 1981) korišteni još:

- [1] Adam, J., Halmos, F., Varga, M. (1979): On the Concepts of Combination of Doppler Satellite and Terrestrial Geodetic Networks. Symposium Satellite Doppler Observations and Geodynamics, Sopron, 1979.
- [2] Anderle, R. J. (1976): Point Positioning Using the Precise Ephemeris. Proceedings of International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning. Las Cruces 1976.
- [3] Anderle, R. J. (1979): Accuracy of Geodetic Solutions Based of Doppler Measurement of NAVSTAR Global Positioning System Satellites. Bulletin Geodesique, Vol. 53, No. 2, str. 109—116, Paris 1979.
- [4] Black, H. D., Jenkins, R. E. and Pryor, L. L. (1975): The Transit Sistem 1975. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland 1975.
- [5] Black, H. D. (1978): An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. Journal of Geophysical Research, Vol. 83, No. 34, str. 1825—1828, 1978.

- [6] Boucher, C., Paquet, P., Wilson, P. (1979): The Second European Doppler Observations Campaign (EDOC-2) — Results and conclusions obtained by EDOC-2 Computing Centers. Presented at the 2nd Int. Geod. Symp. on Satellite Doppler Positioning, Austin, Texas, 1979.
- [7] Halmos, F. (1980): *Osobni razgovori*, Zagreb, 1980.
- [8] Hatch, R., Chamberlain, S., Moore, J. (1979): MX 1502 Doppler Survey Software, Magnavox Technical Paper, January 1979.
- [9] Hopfield, H. S. (1969): Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, No. 18, str. 4487—4499, 1969.
- [10] Hoskins, G. W. (1979): The Future Navy Navigation Satellite System. 2nd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning Geodetic, Austin 1979.
- [11] Jenkins, R. E., Leroy, C. F. (1979): »Broadcast« Versus »Precise« Ephemeris — Apples and Oranges. 2nd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Austin 1979.
- [12] Kouba, J. (1979): Improvements in Canadian Geodetic Doppler Programs. 2nd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, Austin 1979.
- [13] Kouba, J. (1980): Satellite Doppler Positioning for Geodynamics. International Symposium on Space Geodesy and its Applications, Cannes 1980.
- [14] Lelgeman, D. (1979a): Investigations on Short arc computations at the Institut für Angewandte Geodäsie. Symposium Satellite Doppler Observations and Geodynamics. Sopron, 1979.
- [15] Lelgeman, D. (1979b): Diskusija na simpoziju u Sopronu 1979. godine.
- [16] Saastamionen, J. J. (1973): Contribution of the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Geodesique*, No. 107, str. 13—34, Paris 1973.
- [17] Seeber, G., Egge, D. (1981): Positionsbestimmung mit Satelliten-Dopplerverfahren in bewegter Situation. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, Jg. 106, H. 3, str. 123—131, Stuttgart 1981.
- [18] Solarić, M., Čolić, K. (1981): Uvodno razmatranje o doplerovskim mjerenjima u vezi s njihovom primjenom u SFRJ, *Geodetski list* br. 4—6, Zagreb, 1981.
- [19] Wolf, H. (1981): *Osobni razgovori*, Zagreb, 1981.
- [20] Yionoulis, S. M. (1970): Algorithm to compute tropospheric refractions effects on range measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 36, str. 7636—7637, 1970.

SAŽETAK

U ovom članku je najprije ukazano na razlike između operabilnih i preciznih efemerida, a zatim su analizirani izvori pogrešaka i opisane mogućnosti smanjenja njihovog utjecaja na točnost koordinatnog određivanja doplerovskih stanica. Doplerovske metode rada izložene su u posljednjem poglavlju, te se zalaže za primjenu višestaničnog postupka pri uvođenju doplerovskih mjerenja satelitske geodezije u SFR Jugoslaviji. Eventualna primjena »short arc« modela dolazi u obzir u kasnijim fazama doplerovskih mjerenja na jugoslaven-skom teritoriju.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel wurden zunächst die Unterschiede zwischen operativen und präzisen Ephemeriden gezeigt, und danach die Fehlerquellen ana-

lysiert, sowie die Möglichkeiten der Verminderung ihrer Einflüsse auf die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung von Dopplerstationen angegeben. Die dopplerischen Arbeitsmethoden wurden im letzten Kapitel einzeln dargestellt, und dabei die Anwendung des Multistationsverfahrens bei der Einführung Dopplerbeobachtungen der Satellitengeodäsie in SFR Jugoslawien befürwortet. Die eventuelle Verwendung von »short arc« — Modellen kommt in Betracht bei späteren Phasen der Dopplerbeobachtungen auf jugoslawischem Territorium.