

UDK 528.02 : 681.396.962.33
Pregledni rad

UVODNO RAZMATRANJE O DOPLEROVSKIM MJERENJIMA U VEZI S NJIHOVOM PRIMJENOM U SFRJ*

M. SOLARIĆ i K. ČOLIĆ**

1. POLAZNE POSTAVKE

Ovdje se pod »doplerovskim mjerenjima« podrazumijeva posebna vrsta mjerenja u satelitskoj geodeziji, za koju se koriste radio-signalni odaslani sa Zemljinih umjetnih satelita, za određivanje prostornih koordinata stajališnih točaka (stanica) na Zemljinoj površini, na kojima su u tu svrhu za prijem locirani specijalni doplerovski mjerni uređaji. Ova se vrsta mjerenja već koristi širom svijeta, ali još ne postoji na teritoriju SFR Jugoslavije. Od pred nekoliko godina ona postoje u većini zapadnoevropskih zemalja, pa su od tada izvedena mjerenja u sklopu tzv. doplerovskih opažачkih kampanja internacionalnog karaktera (EDOC I, DODOC, EDOC II, . . .) vidi npr. (Schlüter 1978), (Wilson 1978).

Nedavno su se tim državama uz neutralnu Švicarsku i neutralnu Austriju pridružile i istočnoevropske zemlje SSSR, ČSSR, Poljska, DDR i Mađarska, i to u okviru zajedničke »zapadno-istočnoevropske doplerovske opažачke kampanje« (kratica: WEDOC), (Pesec 1980). Na taj način je ova nova tehnologija uvedena u većini nama susjednih zemalja, tj. u Mađarskoj, Austriji, Italiji i Grčkoj. Može se očekivati da će se uskoro i drugi naši susjedi priključiti tim internacionalnim projektima, jer je već izražen interes NR Bugarske za učestvovanje u eventualnoj drugoj fazi WEDOC-a. Uključivanje svih navedenih zemalja s različitim društvenim uređenjima u zajedničku evropsku mrežu doplerovskih stanica govori sasvim dovoljno o opravdanosti, ali i o koristi koju ima svjetska nauka od ovakvih zahvata. Naime, važeće koordinate tih stanica u pojedinim geodetskim mrežama nacionalnih protezanja uopće se ne koriste za potrebe međudržavnih doplerovskih kampanja.

Međutim, s doplerovskim mjerenjima se pridonosi ne samo internacionalnim naporima u obuhvaćanju fundamentalnih geodetskih problema, već se

* Ovaj rad je nastao u okviru znanstveno-istraživačkog zadatka (teme A2.4) »Regionalno istraživanje oblika i disanja (plimnih valova) Zemlje«, koji se odvija na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu od 1976. godine uz financiranje Republičke samoupravne interesne zajednice (odnosno SIZ III) za znanstveni rad SR Hrvatske.

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

omogućuje i veoma efikasno rješavanje vitalnih geodetskih zadataka u nacionalnim granicama. Pri tome svaka zemlja postupa prema svojim potrebama i mogućnostima. Prema najnovijim informacijama je npr. u susjednoj Republici Austriji nedavno izveden veoma interesantan eksperiment s kojim se želi uz pomoć doplerovskih mjerenja satelitske geodezije ispitati položajna točnost koordinata osnovnih geodetskih točaka (Rinner, Pesec 1981). S druge strane također iz susjedne Italije krenuo je pred kratko vrijeme prijedlog jednog projekta, s kojim se namjerava opet uz pomoć doplerovskih mjerenja satelitske geodezije pristupiti ispitivanju treće koordinate — geodetske visine u području cijelog Alpskog masiva (Marchesini 1981), jer je upravo pod Alpama naročito izražen problem korektnog određivanja promjenljivih geoidnih undulacija (visina plohe geoida iznad elipsoida).

Ovom prilikom treba još istaći da je tehnologija doplerovskih mjerenja u posljednje vrijeme naročito prihvaćena u nesvrstanim zemljama širom svijeta. Tako je npr. već 1979. godine objavljeno o programu ovih modernih opažanja na teritoriju Libije s terestričkim stanicama na međusobnoj udaljenosti od 200 km ili manje. Neke druge afričke zemlje izvođenje osnovnih geodetskih radova i čak rješavanje drugih geodetskih zadataka praktične prirode uvjetuju adekvatnom primjenom doplerovskih opažanja. U Aziji se npr. na području nesvrstane Indonezije na ovaj moderni način rješava što je doskora praktički bilo nemoguće, geodetsko spajanje otoka (Rinner, Pesec 1981), dok su na američkom kontinentu (SAD, Kanada i dr.) već ranije ostvareni brojni zahvati te vrste. Još treba barem spomenuti već planirani program značajne primjene doplerovske tehnologije za osnovne geodetske radove u NR Kini, kao i već do sada pozitivno iskušanu mrežu brojnih, na istom principu određenih terestričkih točaka na području Australije (Rinner, Pesec 1981).

Naravno time nisu navedeni svi do sada izvedeni ili za najbližu budućnost planirani projekti doplerovskih mjerenja, kao što su MEDOC (Feissel, Gambis 1979), EROS-DOC (Schlüter i dr. 1978b), itd. Skandinavske zemlje trebaju uskoro dograditi svoje odgovarajuće programe, dok se u praktičnoj primjeni te tehnologije već dosta napredovalo u Francuskoj i SR Njemačkoj. Također je u Poljskoj već realizirano, a u Mađarskoj planirano proširenje doplerovskih opažanja u nacionalnim okvirima; slična je situacija i u nekim drugim državama u Evropi i u svijetu (Švicarska, zemlje Beneluxa itd).

Danas je praktična primjena doplerovskih mjerenja vrlo česta ali i raznolika. Ona se upotrebljavaju u određivanju orjentacionih točaka pri fotogrametrijskim snimanjima, uopće u sferi primijenjene geodezije, zatim radi unutarnje kontrole nacionalnih geodetskih mreža, za uspostavljanje kontinentalnih mreža stabiliziranih geodetskih točaka, ali i u rješavanju nekih geodinamičkih problema i drugih interesantnih zadataka. Velika uloga ove zaista izvanredne metode satelitske geodezije jamačno će se nastaviti, a paralelno s povećanjem njezine točnosti u skoroj budućnosti i osjetno proširiti. U prilog toj tvrdnji govore brojne nove spoznaje i činjenice, kao što su priprema za lansiranje NOVA-satelita, sve bolji i kompaktniji doplerovski mjerni uređaji, još točniji matematički modeli za obradu podataka mjerenja i dr. Sve to prati stalno povećanje broja doplerovskih stanica i naglo povećanje interesa za praktičnu primjenu ove tehnologije u rješavanju različitih zadataka, ne samo iz domene geodezije već i šire.

Naravno, u našoj zemlji nije se moglo ranije upustiti u takve zahvate, ali sada je, po svemu sudeći, došlo konačno vrijeme da se i u SFR Jugoslaviji pri-

stupi sustavnom uvođenju ove nadasve korisne tehnologije. Kasnije će to biti jamačno sve teže, ako ne i nemoguće sprovesti, pogotovo s obzirom na već sadašnji napredak susjednih nam zemalja u tom smislu. Osim toga današnji uvjeti za početak prve faze u ostvarivanju ovog važnog zadatka na jugoslavenskom tlu su veoma povoljni, povoljniji nego ikad ranije. Tu okolnost, kao i pozitivna iskustva drugih, a naročito susjednih zemalja u već izvedenim evropskim doplerovskim kampanjama, valja sada promišljeno upotrebiti za dobrobit jugoslavenske geodezije u cjelini.

U tu svrhu nužno je bilo izraditi prijedlog odgovarajućeg programa, kojeg je moguće još dotjerati na temelju korisnih sugestija, iako se može očekivati da one ipak neće donijeti neke značajnije promjene u osnovnom pristupu. Zbog toga se prije gotovo tri godine na Geodetskom fakultetu u Zagrebu započelo s izradom jedne dosta opsežne studije o mogućnostima i preduvjetima za uvođenje doplerovske tehnologije satelitske geodezije u nas. Pri tome je u potpunosti poštivan bazični postulat o jedinstvenosti geodezije unutar granica jugoslavenskog teritorija, pa je u toku istraživanja proizašao i prijedlog za »nultu geodetsku mrežu SFRJ«, za koju je već u početnoj etapi njezinog uspostavljanja neophodno upravo izvođenje što preciznijih doplerovskih mjerenja u okviru međunarodne suradnje. Međutim, zbog opravdane opsežnosti te studije pod naslovom »Doplerovska opažanja satelitske geodezije i projekt primjene na geodetsku mrežu 0-reda SFRJ« zahtjevala je mnogo vremena, pa iako je uglavnom dovršena, još se ne nalazi u definitivnoj formi potrebnoj za objavljivanje. Zbog toga razloga, ali još više zbog neminovne potrebe da odnosni jugoslavenski program doplerovskih opažanja proizide na temelju zajedničkih dogovaranja svih zainteresiranih i nadležnih faktora, autori su se odlučili da na stranicama »Geodetskog lista«, časopisa svih geodetskih stručnjaka u SFRJ, objave nekoliko članaka, u kojima će se prikazati problematika doplerovskih mjerenja satelitske geodezije. Budući da je ova materija širokom krugu geodetskih stručnjaka uglavnom nepoznata, u ovom se prvom članku prezentiraju osnovne značajke doplerovskih mjerenja i dva bitna elementa za razumijevanje principa ove moderne tehnologije.¹ Kasnije će se prikazati i analizirati svi važniji aspekti kao što su: doplerovski prijemni uređaji, izvori pogrešaka, različiti postupci doplerovskih mjerenja, pitanja vezana za praktično provođenje opažanja i kompjutorske obrade podataka, problem povezivanja »data« i dr.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE PRIMJENE »DOPLEROVSKE« METODE

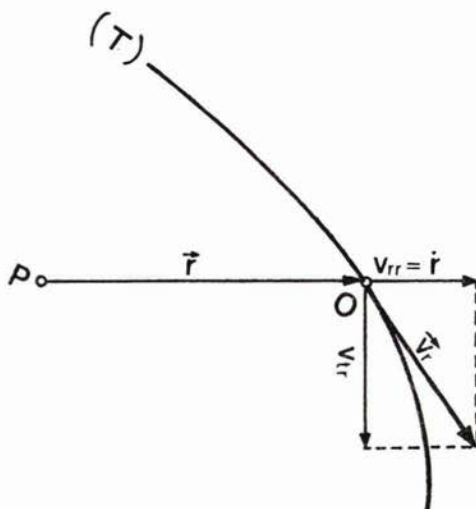
2.1. Efekt Ch. Doppler-a i primjena u satelitskoj geodeziji

Christian Doppler je svoj najznačajniji rad »Über das farbige Licht der Dopplesterne« napisao u Pragu 1842. godine. U njemu je on objasnio da dolazi do promjene frekvencije, ako se izvor vala (zvuka, svjetla i dr.) relativno približava ili udaljuje od promatrača. To je onaj svima nama poznati efekt: kad se vlak približava nepomičnom opažaču, visina tona zvučnog signala loko-

¹ Do sada o toj vrsti mjerenja u geodetskoj stručnoj literaturi u nas bilo ukratko riječi samo u lijepom preglednom članku (Muminagić 1979).

motive je sve viša, dok se pri udaljavanju vlaka visina tona istog piska lokomotive opet snižava. Tu pojavu nazvalo se je doplerovim ili doplerovskim efektom, a pomaknuta frekvencija f_p primljenih valova može se izraziti jednadžbom (Mueller, 1964)

$$f_p = f_o \cdot \left(1 + \frac{\dot{r}}{c}\right), \dots\dots\dots (2-1)$$



Sl. 2.1. Shematski prikaz komponenti od v_r

gdje je: f_o — frekvencija odaslanih valova, \dot{r} — radijalna komponenta relativne brzine izvora valova O u odnosu na promatrača P i c — brzina širenja valova. Shematski prikaz sastavnih komponenti vektora v_r relativne brzine odašiljača O u odnosu na promatrača P daje sl. 2.1.; značenje oznaka je: T — trajektorija, \vec{r} — radius vektor položaja odašiljača O u odnosu na opažača P , v_{rr} — radijalna komponenta relativne brzine i v_{tr} — transverzalna komponenta relativne brzine.

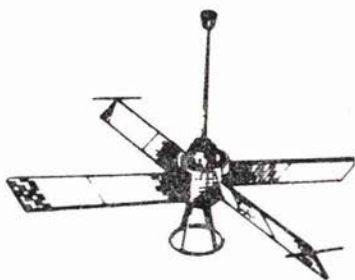
Ova se ideja dugo nije primjenjivala u geodeziji. Tek u posljednjih desetak godina počela se značajno razvijati metodika mjerenja na bazi doplerovog efekta (kraće rečeno: »doplerovskih« mjerenja), prema Zemljinim umjetnim satelitima (ZUS-ima), kao pogodnim izvanterestričkim ciljevima. U njima su smješteni odašiljači radio-valova, koji stalno emitiraju u određenom frekvencijskom području. S druge strane, konstruirani su u međuvremenu i veoma sposobni »doplerovski« mjerni instrumenti, tj. neophodni uređaji koji rade na principu doplerovog efekta, a primaju spomenute radio-valove od odašiljača sa ZUS-a i mjere pomak frekvencije. Ipak početak je bio obrnut, jer su znanstvenici u »The Applied Physics Laboratory of John Hopkins University« (SAD) upotrijebili doplerov efekt odmah poslije izbacivanja prvog umjetnog satelita »Sputnjik« 1957. godine za određivanje njegove putanje. Znači, oni su mjerili pomake frekvencije radio-valova odaslanih iz satelitskog odašiljača a primljenih na odabranim stanicama, čije su koordinate bile poznate i u

sistemu tih koordinata računali položaj satelita. Nedugo zatim, dao je fizičar dr Frank Telford McClure sugestiju da se pomoću doplerovog efekta riješi inverzni problem, tj. da se položaji točaka na moru i na kopnu određuju na osnovu doplerovog pomaka frekvencija primljenih valova iz radio-odašiljača postavljenog na satelitu, pri čemu se koriste poznati (!) položaji satelita odnosno poznati parametri njegove orbite.

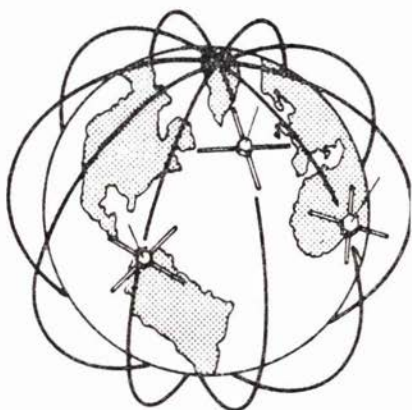
2.2. Sistem posebnih satelita

Pokazalo se odmah da je i problem prethodnog određivanja odnosno poznavanja elemenata putanje satelita također rješiv do nekih granica točnosti. Tako je 1958. godine bio koncipiran primarno za navigaciju brodova Navy Navigation Satellite System (skraćena NNSS) koji je u upotrebi u U. S. Navy (Pomorskim snagama SAD) od siječnja 1964. godine. Za civilnu upotrebu dopušten je u srpnju 1967. godine. Ovaj sistem je za geodetske praktične primjene postao interesantan tek negdje od 1970. godine, kada je povećana točnost određivanja položaja točaka ovim načinom uz pomoć sposobnijih doplerovskih uređaja i preciznijih postupaka (metoda) opažanja.

NNSS zamišljenje tako da se u orbitu oko Zemlje lansira 6² satelita tipa TRANSIT (vidi sl. 2.2. i 2.3.) u približno kružne polarne orbite na visini oko 1000 km s periodom ophoda oko Zemlje od 107 minuta. Svaki satelit tipa TRANSIT, zbog rotacije Zemlje, siječe ekvator, poslije svakog kružnog ophoda oko Zemlje na mjestu udaljenom za 26° zapadno od mjesta gdje je prelazio ekvator u prethodnom ophodu. Tim sistemom satelita postiže se da na svakom mjestu na Zemlji možemo relativno često registrirati prolaze satelita tipa TRANSIT, tj. uz pomoć prijema njihovih radio-signala odrediti pozicije broda odnosno koordinate neke točke na kopnu.



Sl. 2.2. Satelit — TRANSIT



Sl. 2.3. Navy Navigation Satellite System (NNSS)

Na srednjim geografskim širinama, gdje se nalazi i teritorija SFR Jugoslavije, može se maksimalno raspolagati s cca 40 do 50 prolaza satelita na

² Sada se u orbiti nalazi 5 upotrebljivih satelita tipa TRANSIT čiji su brojevi: 30190, 30200, 30120, 30140 i 30130 jer se jedan ranije »ugasio«.

dan, dok za ekvatorska područja taj broj opada na 20 do 30 prolaza unutar 24 h. Međutim, praktički se broj korisnih — upotrebljivih prolaza satelita znatno smanji uslijed ipak neizbježnih smetnji u eteru, nepotpunog kuta horizonta i drugog, pa treba naročitu pažnju posvetiti izboru položaja terostričkih doplerovskih stanica.

Svaki satelit tipa TRANSIT ima: prijemnik naredbi, dekođer podataka, čitajući kontrolni krug s faznim modulatorom numeričkih podataka, stabilan oscilator od 5 MHz, te radio-odašiljače od 1,5 W. Masa satelita je oko 68 kg, a njegove dimenzije su 46 cm × 30 cm bez ploča za skupljanje sunčane energije i stabilizatora. Stabilizator omogućuje da su antene odašiljača pravilno orijentirane. Podaci su preuzeti iz (Decca, 1978).

Odašiljači sa satelita emitiraju dvije vrlo stabilne koherentne noseće frekvencije elektromagnetskih valova u ultrakratkom valnom području od okruglo 150 MHz i od 400 MHz. One su fazno modulirane, prenoseći na taj način radio-vezom korisnicima na Zemlji poruku o položaju satelita, tj. o fiksnim elementima srednje orbite satelita i poremećajima u gibanju satelita kao i ostale potrebne informacije. Te poruke, tzv. efemeride, se počimaju odašiljati svake parne minute Svjetskog vremena (UT), te je tako osigurano i vremensko vezivanje, što je neobično važno kad se zna da sateliti TRANSIT pređu svake sekunde cca 7,5 km oko Zemlje. Na taj način se satelite TRANSIT treba smatrati kao nosioce vlastitih koordinata položaja X, Y i Z u trenutku opažanja i to u odabranom za Zemlju fiksnom geocentričkom koordinatnom sustavu.

2.3. Elementi prijemničkih (mjernih) uređaja i princip rada

Doplerovski mjerni uređaji mogu biti čvrsto instalirani na stalnim opažачkim stanicama, a još češće u prijenosnoj izvedbi za određivanje koordinata novih stajališnih točaka, npr. odabranih trigonometara, orijentacionih točaka i dr. Ovdje je riječ samo o prijenosnim verzijama uređaja ove vrste, koji su primjenljivi u rješavanju geodetskih zadataka na kopnu.³

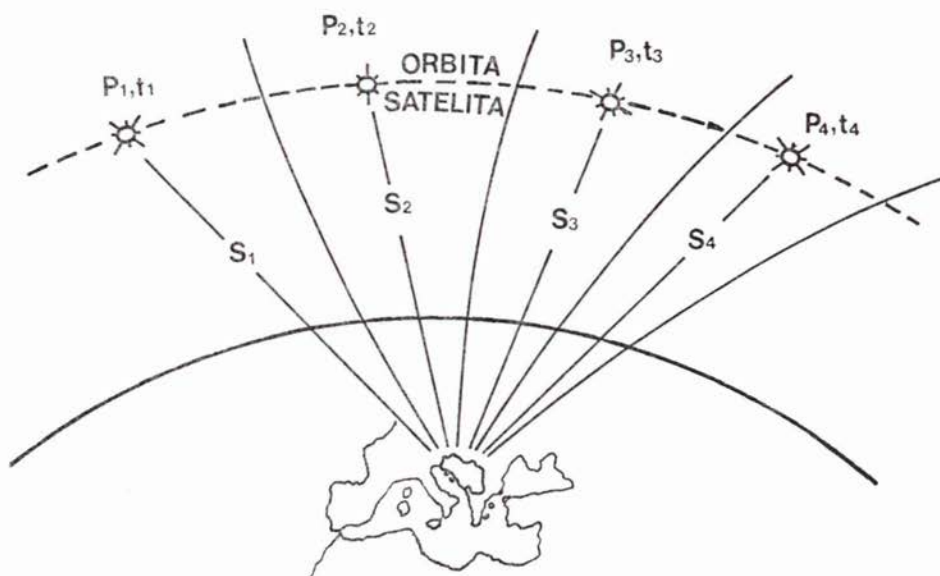
Kompletni uređaj za prijem na doplerovom principu sastoji se od slijedećih dijelova — elemenata: 1. antena s pojačalom, 2. prijemnik s električnim brojilom i dr., te 3. jedinica za registriranje podataka mjerenja na magnetske trake u kazetama. Uz ovo dolazi u novim izvedbama još: 4. procesno računalo (mikro-kompjutor) za pripremu odnosno sređivanje podataka opažanja i privremeno računanje geocentričkih koordinata stajališta.

U ovom članku neće se ulaziti u razmatranje pojedinih, na tržištu postojećih tipova prenosnih doplerovskih uređaja za geodetsku primjenu. Zajedničko im je da imaju napajanje iz 12 V akumulatora, ali se većina može priključiti preko odgovarajućeg pretvarača na standardnu električnu mrežu. Nadalje, svi ti uređaji prihvaćaju, uz pomoć pogodne antene, obje frekvencije radio-valova odaslanih s TRANSIT-satelita prilikom njihovih promatranih prolaza iznad horizonta stajališta. Primljeni signali se najprije pojačavaju, a zatim se odvođe na prijemnik, registriraju te obrađuju u mikroprocesoru. Proizlazi da tok ovih

³ Navigacijske doplerovske aparature instalirane na brodovima su također od velike važnosti, ali one su često izvedene kao značajna komponenta jednog integriranog sistema za pozicijska određivanja na moru.

opažanja ne nalikuje klasičnoj predodžbi geodetskih mjerenja, a teče potpuno automatski. Cijeli proces rada je uglavnom automatiziran, pa su opažači potrebni samo radi kontrole rada instaliranih uređaja kako po danu tako i po noći.

Uređajima na Zemlji mjeri se integral doplerovog pomaka frekvencija, tzv. doppler count (doplerovski zbroj) N_{jk} radio-valova odaslanih sa satelita unutar nekog vremenskog intervala, na primjer za 30 sekundi. Taj integral omogućuje određivanje razlike dužina radius-vektora položaja satelita na početku i na koncu mjernog intervala (vidi poglavlje 3 i tamo jednadžbu 3—8). Izmjerene razlike dužina određuju kao geometrijsko mjesto točaka hiperboloid, na kojem se mora nalaziti i stajalište uređaja, točnije — njegove antene. Dalji »dopplercount-i« tvore druge hiperboloide kao stajališne plohe, a njihov presjek određuje konačno prostorni položaj opažačke stanice P, kao što se vidi na sl. 2.4. Prema navedenom principu rada doplerovskih mjernih uređaja je



Sl. 2.4. Određivanje položaja stanice presjecima hiperboloida

u osnovu zaista jednostavan. Ipak se zbog postizanja zadovoljavajuće točnosti određivanja položaja stajališnih točaka moraju primijeniti složeni postupci odnosno rješenja u samom procesu mjerenja kao i numeričkoj obradi dobivenih podataka. (Zbog ograničenog prostora u te se probleme neće moći ulaziti već u ovom članku).

2.4. Prednosti satelitskih doplerovskih mjerenja

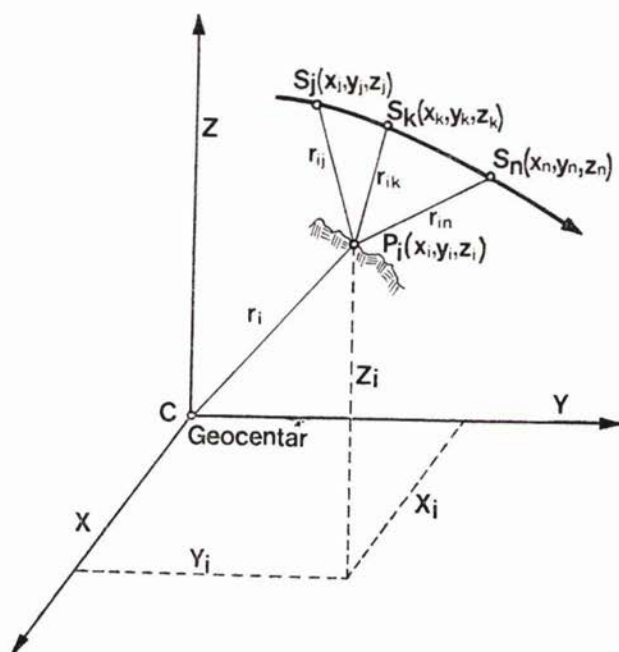
Izgleda da je ipak presudna značajka doplerovskih mjerenja satelitske geodezije upravo činjenica da se u kratkom vremenskom intervalu automatski registrira na magnetske trake (kasete) zaista velika količina mjernih podataka. Oni su na taj način već pripremljeni ne samo za prvotnu kompjutorsku obradu, koja se izvodi još za vrijeme terenskih mjerenja, nego i za definitivna ra-

čunanja na elektroničkom računskom sistemu. Zato ta složena računanja u cjelosti mogu uslijediti praktički odmah po završetku terenske kampanje, ukoliko su unaprijed osigurani odgovarajući kompjutorski programi. Doplerovska mjerenja imaju naspram konvencionalnih mjernih postupaka još jednu značajnu prednost, ona su praktički neovisna o vremenskim prilikama i dobu dana, a uz to ne zahtijevaju niti dogledanje susjednih točaka. Stoga ne čudi ni prvotna primjena doplerovskih mjerenja na izoliranim i teško pristupačnim točkama Zemljine fizičke površine, (vidi npr. — — — 1976) iako se već danas upotrebljavaju u velikom broju država (ne samo blokovskih već i neutralnih odnosno nesvrstanih!) za rješavanje raznih geodetskih zadataka, u kojima je neophodno određivanje koordinata ili koordinatnih razlika promatranih točaka. Određivanje koordinatnih razlika umjesto direktnog iznalaženja geocentričkih koordinata stajališnih točaka naročito je interesantno i korišteno već u nizu internacionalnih i bilateralnih projekata (»doppler observation campaigns«). Ovu činjenicu valja upamtiti! Širokoj primjeni doplerovskih mjerenja naročito doprinosi značajno povišenje njihove točnosti u posljednjih desetak godina zahvaljujući radu i istraživanjima različitih agencija, sveučilišta i kompanija. Tako je koncem 1977. odnosno početkom 1978. godine bilo teško postići s pogodnim odvijanjem mjernog procesa i pažljivom numeričkom obradom podataka točnost nešto bolju od ± 1 m (Seeber 1918). Sada se nakon dvije godine susreću brojni izvori literature (vidi npr. (Seeber 1979), (— — — 1979)), u kojima se navode često točnosti određivanja koordinata od $\pm 0,5 \dots \pm 0,2$ m, a za prostorne koorinatne razlike, štoviše, oko $\pm 0,1$ m. Dakle, postaje mogućom sigurnost čak reda veličine decimetra u određivanju takvih udaljenosti staničnih točaka koje mogu dosegnuti iznose od nekoliko stotina do i više od tisuću kilometara. Značaj ovog dostignuća za cjelokupnu geodeziju ne treba više naglašavati, jer se ranije uz primjenu klasičnih geodetskih postupaka nije moglo niti pomišljati na toliko visoku preciznost pri određivanjima tako velikih udaljenosti terestričkih točaka. Usporedbe radi podsjetimo da se u klasičnoj geodeziji najtočnije mreže oslanjaju na astronomske točke kod kojih se zahtijeva da širina bude određena sa sr. kv. pogreškom $\pm 0,3''$, a to je 9 m na površini elipsoida.

Sve ovo ostvareno je zahvaljujući razvijanju (sve sposobnijih metoda) doplerovskih mjerenja i obrade podataka opažanja. Tako se umjesto prvotnog jednostaničnog rješenja gdje se opažalo samo na novoj stajališnoj točki sada koristi multistanični (translokacijski) postupak koji zahtijeva istovremeno opažanje na dvije odnosno na više stanica. Još je jedan element od ne male važnosti, a to je relativno niska cijena pojedinih kompleta doplerovskih uređaja. Tako na primjer sam doplerovski prijemnik stoji oko 1,000.000.— Din, ali tu treba pribrojiti i ostali potrebni pribor, te ukupna cijena čitavom uređaju doseže iznos blizu 3,000.000.— Din. Svemu tome valja dodati i najnovije vijesti o skorašnjoj realizaciji novog sistema satelita za ove svrhe, što već prati razvoj prototipova još sposobnijih uređaja čak s jednostavnijim rukovanjem nego do sada. Dakako, postoje i neke druge prednosti ove vrste mjerenja, ali se na ovom mjestu ne može ulaziti u sve bitne pojedinosti. (O njima će zato kasnije biti više govora. Međutim, već iz naprijed navedenog sasvim je jasno da doplerovska mjerenja satelitske geodezije i široke mogućnosti njihove praktične primjene pobuđuju opravdano veliki interes svakog geodetskog stručnjaka progresivne orijentacije.

3. »DOPPLER COUNT« I POJEDNOSTAVLJENI MATEMATIČKI MODEL

Osnovni pojam doplerovskih mjerenja satelitske geodezije je »Doppler count« (doplerovski zbroj) koji će se ovdje pobliže objasniti.



Sl. 3.1. Princip doplerovskih mjerenja

Na sl. 3.1. ilustriran je princip doplerovskih mjerenja, pa će se ovdje prikazati još samo pojednostavljeni matematički model za traženo rješenje, jer problem ipak nije toliko jednostavan kako u prvi moment možda izgleda. Neka se sa f_0 označi frekvencija radio-valova odaslanih sa satelita, sa f_p — frekvencija tih radio-valova primljenih na opažačkoj stanici, sa f_s — stabilna referentna frekvencija proizvedena u prijemniku, t_j , t_k — vrijeme u trenutku odašiljanja vremenskih signala sa satelita respektivno na početku i na kraju intervala, T_j, T_k — vrijeme u trenutku primanja tih istih vremenskih signala na stanici na Zemlji, c — brzina širenja elektromagnetskih valova, a N_{jk} — »doppler count« između vremenskih signala (»markica«) T_j i T_k .

U prijemniku se mjeri razlika frekvencije

$$\Delta f = f_s - f_p \quad (3 - 1)$$

u promatranom vremenskom intervalu

$$T_k - T_j = (t_k + \Delta t_k) - (t_j + \Delta t_j) \quad (3 - 2)$$

gdje je Δt_k odnosno Δt_j jednako intervalu vremena širenja radio-valova od satelita do opažačke stanice odaslanih u trenutku t_k odnosno t_j .

Elektronički uređaj je konstruiran tako da se sumiraju sve te promjene frekvencija u vremenskom intervalu ($T_k - T_j$), a to znači da se mjerenjem određuje veličina

$$N_{jk} = \int_{T_j}^{T_k} \Delta f \cdot \Delta t = \int_{T_j}^{T_k} (f_s - f_p) \cdot dt \quad (3-3)$$

i to je upravo naprijed već navedeni »doppler count« (doplerovski zbroj).

Između vremena t_j i T_j odnosno između t_k i T_k postoje vezne relacije:

$$T_j = t_j + \Delta t_j = t_j + \frac{r_{ij}}{c} \quad (3-4)$$

$$t_k = t_k + \Delta t_k = t_k + \frac{r_{ik}}{c}$$

te zbog toga vrijedi izraz:

$$N_{jk} = \int_{t_k + \frac{r_{ik}}{c}}^{t_j + \frac{r_{ij}}{c}} (f_s - f_p) \cdot dt \quad (3-5)$$

r — je u ovim formulama radius-vektor, odnosno udaljenost od stanice do satelita. Budući da odaslani broj valova mora u vremenskom intervalu $t_k - t_j$ biti jednak broju primljenih valova u intervalu $T_k - T_j$, bit će:

$$\int_{t_k}^{t_j} f_o dt = \int_{t_k + \frac{r_{ij}}{c}}^{t_j + \frac{r_{ik}}{c}} f_p dt, \quad (3-6)$$

pa se jednačba (3—5) može napisati u obliku:

$$N_{jk} = (f_s - f_o) (t_k - t_j) + \frac{f_s}{c} (r_{ik} - r_{ij}). \quad (3-7)$$

Želi li se na koncu uspostaviti veza sa često isticanom činjenicom u literaturi, da se doplerovskim mjerenjima određuje samo razlike udaljenosti do promatranih pozicija satelita S_j i S_k poslužit će relacija (Torge, 1975.):

$$r_{ik} - r_{ij} = \frac{c}{f_s} N - c \frac{(f_s - f_o)}{f_s} (t_k - t_j) \quad (3-8)$$

koja proizlazi neposredno iz izraza (3—7).

Praktički se u prijemniku doplerovskog uređaja primljeni signali frekvencije f_p najprije pojačavaju (s pomakom Δf naspram kontinuirano sa satelita emitirane frekvencije f_o). Zatim se uspoređuju sa signalima vrlo konstantne frekvencije f_s koju proizvodi sam prijemnik i koja leži blizu frekvencije f_o , odnosno u blizini primljene, zbog doplerovog efekta pomaknute frekvencije f_p . Razlika $f_s - f_p$ se onda integrira u električnom brojaču preko vremenskih in-

tervala $T_2 - T_1$, $T_3 - T_2$ itd. Pri tome se u praksi pokazalo da je za integracijski vremenski razmak (doppler count) najpovoljnije uzeti interval od 20 do 30 sekundi.

Kvadrata radius-vektora položaja satelita u odnosu na opažačku stanicu može se izraziti jednadžbama:

$$\begin{aligned} r_{ij}^2 &= (X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2 \\ r_{ik}^2 &= (X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2 \end{aligned} \quad (3-9)$$

gdje su X_i , Y_i i Z_i koordinate opažačke stanice u prostornom pravokutnom koordinatnom sustavu, dok su X_j , Y_j i Z_j odnosno X_k , Y_k i Z_k prostorne koordinate satelita u trenutku t_j odnosno t_k . Uvrstivši jednadžbe (3—9) u jednadžbu (3—7) dobit će se konačno jednadžba za funkcionalni model doplerovskih mjerenja satelitske geodezije u obliku:

$$\begin{aligned} N_{jk} &= \frac{f_s}{c} \left\{ \sqrt{(X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2} - \right. \\ &\left. - \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \right\} + (f_s - f_o)(t_k - t_j) \end{aligned} \quad (3-10)$$

U ovoj jednadžbi su samo nepoznanice tražene geocentričke koordinate X_i , Y_i i Z_i opažačke stanice P_i . Prema tome, u jednadžbi (3—10) nalaze se tri nepoznanice, te će biti potrebno da se izmjeri najmanje tri »doppler counta«, s uređajem na stanici, za vrijeme jednog prolaza satelita, da bi se mogle napisati tri nezavisne jednadžbe. Budući da se u geodeziji nikada ne zadovoljava samo s minimalnim brojem mjerenja nastoji se izmjeriti što veći broj »doppler counta« odnosno razlika dužina, da bi se postavljanjem jednadžbi pogrešaka i njihovim rješavanjem po metodi najmanjih kvadrata moglo onda izračunati najvjerojatnije vrijednosti koordinata opažačke stanice.

Ovdje se navodi još samo oblik jednadžbe pogrešaka kada se istovremeno određuje i popravka frekvencije:

$$v + B_{jk} = K_{jk} \cdot dX + L_{jk} \cdot dY + M_{jk} \cdot dZ + P_{jk} \cdot d(\Delta f) \quad (3-11)$$

gdje je:

v — popravka razlike dužina, zatim

$$B_{jk} = \lambda [N - (t_k - t_j) \cdot (f_s - f_o)] - (r_k - r_j)_r; \quad K_{jk} = \frac{X_{ri} - X_k}{r_k} - \frac{X_{ri} - X_j}{r_j}; \quad (3-12)$$

$$L_{ik} = \frac{Z_{ri} - Z_k}{r_k} - \frac{Z_{ri} - Z_j}{r_j}; \quad P_{jk} = \lambda (t_k - t_j); \quad \lambda = c/f_s;$$

r — indeks za računate vrijednosti dužina iz približnih koordinata stajališta; X_{ri} , Y_{ri} , Z_{ri} — približne vrijednosti koordinata stajališta; $d\Delta f$ — popravka frekvencije.

Naravno pojavljuje se još složeniji slučaj kad se istovremeno kao nepoznanice u model izjednačenja uvodi velik broj parametara za određivanje kori-

girane putanje satelita. Zapravo, uz navedeni funkcionalni (deterministički) model neophodno je uvesti odgovarajući stohastički (slučajni) model, te numerička obrada postaje veoma komplicirana.

4. OPERABILNE I PRECIZNE EFEMERIDE SATELITA

4.1. Operabilne efemeride

Treba naglasiti da se samo za slučaj operabilnih (odaslanih) efemerida može odgovarajuće satelite shvatiti kao nosioce svojih koordinata. Drugi naziv za ove podatke o putanji satelita, koje radio-vezom šalju odašiljači sa satelita, je »broadcast-efemeride«, a dobivaju se na slijedeći način: Na 4 stalne stanice (Maine, Minnesota, California i Hawai) u SAD izvode se neprekidna doplerovska mjerenja. Zatim posebne radne grupe se na temelju 36-satnih opažanja izračunaju (U. S. Navy Astronautics Group iz Point Mudu — California) elemente putanje za svaki od opaženih satelita. Tako određeni podaci prenose se onda radio-vezom svakih 12 sati do pojedinog satelita i tamo memoriraju. Na taj način svaki satelit tipa TRANSIT može stalno emitirati »broadcast-efemeride« u ultrakratkom valnom području i to u razmacima od po 2 minute, tj. jedan potpun slog informacija za svoju korigiranu putanju i pripadne trenutke opažanja Svjetskog vremena (UT). Ti podaci su dovoljni da se s njima mogu izračunati geocentričke koordinate X, Y, Z za odgovarajuće položaje opaženog satelita.

Važno je naznačiti da se geocentričke koordinate satelita odnose na takozvani Svjetski geodetski sustav 1972 (WGS 72), koji je osnovan na razvoju Zemljinog gravitacionog potencijala u red po sfernim funkcijama do 20. reda i stupnja.⁴ To je važno napomenuti zbog toga što su efemeride izračunate kao da Zemaljsko gravitaciono polje utječe na gibanje satelita po tom modelu pa će točnost izračunatih položaja satelita zato biti ograničena i srednja pogreška iznosi od ± 5 do ± 10 m. Zato srednja pogreška određivanja koordinata opažачke stanice na Zemljinoj fizičkoj površini pri primjeni takozvanog jednostavnog postupka kod cca 50 prolaza satelita doseže ± 4 do ± 6 m, ali se točnost može — kako će se kasnije prikazati znatno povećati primjenom složenijih metoda rada. Stvarno se u operabilnih efemerida za svake dvije minute odašilje slog podataka sa 6103 binarnih bitova, koji su grupirani u 156 riječi od 39 bita plus posljednja riječ od 19 bita, odnosno ukupno u 26 linija po 6 riječi. Pri tome prve tri riječi omogućuju prijemniku odrediti početak parne minute Svjetskog vremena.

Podaci o orbiti satelita daju se u 25 linija, od toga je prvih 8 varijabilnih linija, a ostalih 17 su fiksne linije — neipromjenljivi parametri. U prvih 8 varijabilnih linija (efemeralnih linija) dani su varijabilni parametri, koji sadrže vrijeme i 3 veličine o odstupanju orbite satelita od srednje putanje za osam trenutaka i to: tri prethodna momenta, sam moment i četiri kasnija momenta dvominutnih oznaka (»markica«), tj. za trenutke $t_k - 6$, $t_k - 4$, $t_k - 2$, t_k , $t_k + 2$, $t_k + 4$, $t_k + 6$, $t_k + 8$, gdje je t_k vrijeme početka dvominutne poruke u

⁴ O sfernim funkcijama i njihovoj primjeni u geodeziji može se pročitati u radovima: Solarić 1971, Živković 1978. i Čolić 1979.

trenutku opažanja. Navedene 3 veličine su: — popravka ekscentrične anomalije $E(t)$, — popravka velike poluosi elipse $a(t)$, te komponenta okomita na ravninu putanje $\eta(t)$.⁵

Posljednjih 17 fiksnih linija ponavlja odašiljač nepromjenjene (kroz neko vrijeme) svake dvije minute, a u njima se nalaze parametri srednje orbite satelita, indentifikacijski broj satelita, vrijeme i dan posljednjeg upisa podataka u memoriju satelita te kvocjent $(f_n - f_0)/f_n$ nominalna vrijednost frekvencije odašiljača na satelitu 399, 968 MHz, a f_0 je emitirana frekvencija.

Podaci za varijabilne parametre korespondiraju u posljednjoj znamenici iznosu od otprilike 10 m. S emitiranim vremenskim markicama definiran je ustvaridvominutni interval integracije. Međutim, najmanji praktički mogući integracijski interval od cca 4,6 sekundi odgovara dužini pojedinog sloga podatka, kako se to ističe u (Decca 1978), a u praktičnom radu se, kako je već spomenuto, upotrebljavaju znatno duži intervali integracije (doppler count-i). Veliki značaj operabilnih efemerida leži u dvije činjenice:

1. one stoje za svakog korisnika neposredno na raspoloženju.
2. one osiguravaju kod primjene simultane metode opažanja podjednaku točnost kao i »precizne« efemeride.

4.2. Precizne efemeride

Precizne efemeride nisu nažalost za sada dostupne širem krugu korisnika. One se naknadno određuju za jedan do maksimalno dva odabrana satelita i to na temelju 48-satnih opažanja čak na oko 20 globalno raspoređenih stalnih terestričkih stanica s čvrsto instaliranim doplerovskim uređajima. Te efemeride imaju oblik minutnih pravokutnih koordinata satelita s njihovim promjenama tijekom vremena u geocentričkom koordinatnom sistemu čvrsto vezanom sa Zemljom. Zapravo, one se odnose na dosad još sasvim neobjavljen »NWL-9D« referentni sistem, koji bazira na modelu za Zemljino polje sile teže od ukupno 478 koeficijenata (Seppelin, 1974.).

Određeno je da se ovi podaci putanje satelita mogu staviti na raspolaganje samo uskom krugu korisnika iz zapadnih zemalja i ne smiju se dalje proslijediti. Štoviše tom malom broju korisnika mogu se na zahtjev dati precizne efemeride samo za tražena ograničena područja i to za kraće periode (»kampanje«) opažanja, a nije dozvoljena upotreba u komercijalne svrhe. Prema tome one su isključene za primjenu (barem za sada) na našem teritoriju, osim možda u sklopu nekog bilateralnog ili internacionalnog projekta opažanja! Kako će se kasnije obrazložiti internacionalni projekti doplerovskih opažanja su za nas daleko interesantniji zbog mogućnosti ostvarenja višestaničnog (translokacijskog) rješenja (metode). Zbog navedenog samo još dvije konstatacije: Točnost preciznih efemerida je dakako visoka i nalazi se oko ± 1 m, pa su one zato naročito važne za spomenuti jednostanični postupak. U slučaju simultanih opažanja one nemaju značajne prednosti pred operabilnim »broadcast« — efemeridama, jer se tada određuju koordinatne razlike među stanicama i tako se isključuju neki značajni fizikalni izvori pogrešaka, što će kasnije u idućem članku biti izloženo.

⁵ To su veličine čije je značenje poznato u satelitskoj geodeziji.

5. ZAKLJUČNA NAPOMENA

Prednja izlaganja predstavljaju uvodna razmatranja u problematici doplerovskih mjerenja satelitske geodezije u vezi njihove moguće primjene u rješavanju nekih važnih geodetskih problema u nas. Ovim se člankom nastoji u tom pogledu ukazati na osnovne značajke ove posebne vrste mjerenja, kao i na dva za razumijevanje doplerovske tehnologije najvažnija aspekta — »doplerovski zbroj« i »satelitske efemeride«. Ujedno je iskorištena prilika da se već sada naznači jedna od nedavno postojeća mogućnost uvođenja doplerovskih opažanja satelitske geodezije na teritoriju SFR Jugoslavije. Naravno, to je samo početna i znatno skraćena informacija o projektu za koji se autori zalažu.

Predmet slijedećih članaka su razmatranja koja se odnose na druge važne aspekte za buduću primjenu doplerovskih mjerenja satelitske geodezije u SFRJ.

- [1] x x x 1976: Proceedings of the International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, 1 i 2, 902 str. Las Cruces, New Mexico, October 12—14, 1976.
- [2] x x x 1979: Satellite Doppler Observation and Geodynamics, Seminar Sopron, 1979.
- [3] x x x 1978: Decca Survey Sat-Fix, Surveying by Satellite, Issue 1, Issue 2, 1978.
- [4] Čolić, K. 1979: Dugovalni (uglačani) gravimetrijski geoid za Jugoslaviju i njegova primjena, Geodetski list br. 7—9 1979, str. 171—191, Zagreb 1979.
- [5] Egge, D., Seeber, G. 1979: Messverfahren zur genauen Positionsbestimmung im Meeresbereich. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 93, Hannover 1979.
- [6] Feissl, M., Gambis, D. 1979: The Determination of Polar Motion from Doppler Tracing of Artificial Satellites, Comparison with Optical Astrometry and Other Techniques, Seminar, Sopron 1979.
- [7] Marchesini, Cl. 1981: Osobni razgovori, Trst 1981.
- [8] Mueller, I. 1964: Introduction to Satellite Geodezy, Frederick Ungar Publishing Co., New York 1964.
- [9] Muminagić, A. 1980: Nova tehnika za visokotačne geodetske radove, Geodetski list br. 1—3, 1980, str. 31—41, Zagreb 1980.
- [10] Nesbo, I. 1976: Comparison of Mathematical Models for Doppler Satellite Positioning (M. Sc. Thesis). Dep. of Surv. Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1976.
- [11] Pesec, P. 1980: West - East European Doppler Campaign (WEDOC), CSTG Bulletin, May 1 1980.
- [12] Pesec, P., Hajos, T. 1979: Doppler Translocation Measurements Graz - Penc, Seminar, Sopron 1979.
- [13] Rinner, K., Pesec, P. 1981: Osobni razgovori. Graz 1981.
- [14] Schluter, W., Seeger, H., Soltau, G., Wilson, P., Wolf, P. 1978a: The Present Status of the German-Austrian Doppler Observation Campaign (DÖDOC), The Second International Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, Athens 1978.

- [15] Schluter, W., Seeger, H., Soltau, G., Wilson, P., Wolf, P. 1978b: The Present Status of the EROS-Doppler Observation Campaign, (EROS-DOC), The Second International Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy and
- [16] Schneider, M., Sigl, R. 1977: Die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 78 Satellitengeodäsie der Technischen Universität München im Jahre 1976. BAW, Astr. Geod. Arbeiten, Hefte Nr. 36, München 1977.
- [17] Schneider, M. 1978: Die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 78 Satellitengeodäsie der Technischen Universität München im Jahre 1977. BAW, Astr. Geod. Arbeiten, Heft Nr. 38, München 1978.
- [18] Seeber, G. 1978: Satelliten-Dopplerbeobachtungen an der Technischen Universität Hannover. Festschrift Walter Höpcke, Wiss. Arb. TU Hannover, Nr. 83, str. 128—138, Hannover 1978.
- [19] Seeber, G. 1979: Satelliten-Doppler Verfahren. Kap. 7. U: Kontaktstudium Geodätische Netze in Landes — und Ingenieurvermessung, Hannover 1979.
- [20] Seger, H. 1978: Ein Vergleich der Ergebnisse im westdeutschen Anteil der deutsch-österreichischen Dopplermesskampagne (DÖDOC) mit dem deutschen Hauptdreieckesnetz. Festschrift Walter Höpcke. Wiss. Arb. TU Hannover Nr. 83, str. 139—148, 1978.
- [21] Seppelin, T. 1974: The Department of Defence World Geodetic System 1972. The Canadian Surveyor, 28, str. 496—506, 1974.
- [22] Solarić, M. 1971: Određivanje koeficijena zonalnih sfernih funkcija gravitacionog polja Zemlje pomoću umjetnih satelita, Zbornik radova Geodetskog fakulteta u Zagrebu, pub. 8, str. 7—24, Zagreb 1971.
- [23] Torge, W. 1975: Geodäsie. Sammlung Goschen, W, de Gruyter, Berlin—New York 1975.
- [24] Wilson, P. 1975: Zum Prinzip von Dopplermessung im Navy Navigation Satellite System. Astr. Geo. Arb., Heft Nr. 23, München 1975.
- [25] Wilson, P., Boucher, C., Paguet, P. 1978: EDOC-2 — Status Report with a Summary of some Preliminary Results of Second European Doppler Observation Campaign, The Second Symposium on the Use of Artificial Satellite for Geodesy and Geodynamics, Athens 1978.
- [26] Živković, A. 1978: Teorija potencijala i njena primjena kod rešavanja nekih zadataka iz teorije oblika Zemlje, Beograd 1978.

SAŽETAK

U prvom dijelu ovog članka obrazlaže se stvarno stanje u primjeni »doplerovskih mjerenja satelitske geodezije« u svijetu i u susjednim evropskim zemljama. Sažeto se prezentira novostvorena mogućnost za uspostavljanje ove izvrsne tehnologije na teritoriju SFR Jugoslavije. U tom kontekstu se zatim ukratko razmatraju osnovne karakteristike korištenja emitiranih radio-valova sa specijalnih Zemljinih umjetnih satelita pomoću doplerovog efekta, a u cilju određivanja prostornih geocentričkih koordinata terestričkih stanica. Konačno se odvojeno analiziraju dva za doplerovsku tehnologiju osnovna elementa — »doplerovski zbroj« i »satelitske efemeride«. U smislu sustavnog uvođenja doplerovskih postupaka Satelitske geodezije u »geodetsku mrežu nultog reda SFRJ« autori će u slijedećim člancima promotriti i druge u tom smislu važne aspekte.

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil dieses Artikels wird der jetzige Zustand in der Anwendung von »Dopplerbeobachtungen der Satellitengeodäsie« in der Welt und in den benachbarten europäischen Ländern dargestellt, und die neugeschaffene Möglichkeit für Einführung dieser vorzüglichen Technologie auf dem Territorium SFR Jugoslawiens zusammenfassend präsentiert. In diesem Zusammenhang werden danach die grundlegende Eigenschaften der Benutzung der ausgestrahlten Radiowellen von künstlichen Erdsatelliten mittels des Dopplereffekts zur Bestimmung der geozentrischen Raumkoordinaten für terrestrische Stationen kurz betrachtet. Schliesslich werden die zwei für die Doppeltechnologie fundamentale Elemente — »Doppler count« und »Satelliten—Ephemeriden« getrennt analysiert. Im Sinne einer sukzessiven Einführung von Dopplerverfahren der Satellitengeodäsie in das »geodätische Netz nulter Ordnung SFRJ« werden von Verfassern in folgenden Absätzen auch die anderen in dieser Hinsicht wichtigen Aspekte untersucht.