

## Vještački sateliti - navigacijska sredstva budućnosti

Kap. freg. Nikola Safonov, Split

Ratna mornarica SAD započela je u 1959. godini lansiranja probnih satelita, koji treba da služe za potrebe navigacije brodova i aviona. Do sada je izvršeno 5 lansiranja, od čega 2 nisu uspjela; sateliti ove vrste nose oznaku »TRANSIT«. Neki podaci o njima iznijeti su već u članku »Vještački sateliti kao sredstvo za navigaciju«, koji je izašao u časopisu »Naše more«, broj 4 od 1961. godine.

Pored sistema »TRANSIT« razmatra se mogućnost upotrebe i drugih vrsta navigacijskih satelita, pa ćemo u ovom članku iznijeti izvjesne teoretske detalje kao i upoređenje pojedinih sistema navigacijskih satelita.

Vještački satelit može služiti u svako doba dana i bez obzira na meteorološke prilike kao orijentaciona tačka za određivanje pozicija, ako emitira određene radio-valove. U koliko je orbita dovoljno visoka, satelit će se moći koristiti na velikom području zemaljske kugle. Očigledno vještački satelit može se upotrebiti za navigacijske potrebe samo pod uslovom da su u svakom momentu njegove koordinate tačno poznate.

Poznavanje koordinata satelita može se izvesti na dva načina:

- direktnim objavljivanjem sa zemlje, t. j. emitiranjem podataka pomoću radio-stanica na zemlji ili iz tablica sličnih »Efemeridama«,
- prenosom podataka radio-putem satelitu, koji ih prima, registruje u elektronskoj memoriji, a zatim sam emitira dalje.

Kod prvog načina je konstrukcija satelita prilično jednostavna ali je sistem upoznavanja interesatna širom zemaljske kugle komplikovan. Kod drugog načina je sistem upoznavanja veoma jednostavan ali je konstrukcija satelita složena, a zbog toga smanjuje se i sigurnost funkcionisanja.

Ako se želi obezbijediti pouzdana i neprekidna navigacija mora satelit prolaziti nad svakom tačkom na zemaljskoj kugli oko desetak puta dnevno, s tim da je »u vidiku« 1 do 15 minuta. Iz ovoga proizlazi da bi se morala uspostaviti mreža od nekoliko satelita, jer samo jedan satelit ne bi obezbjeđivao takvu neprekidnost određivanja pozicija.

Princip određivanja pozicija navigacijskih satelita može biti dvojak — mjerenjem vremena ili na osnovu Doppler-ovog efekta.

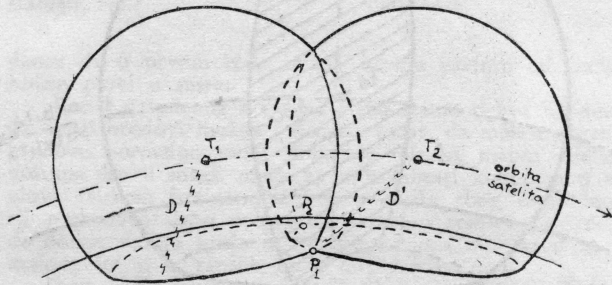
Za određivanje pozicija mjerenjem vremena satelit i osmatrač na zemlji imaju specijalne satove, koji rade sinhronizovano i istovremeno daju vremenske radio-sigurne. Osmatrač na zemlji prima signal radio-predajnika satelita, registruje vrijeme prijema i uspoređuje vrijeme prijema sa vremenom predaje. Vremensko zakašnjenje prijema signala ( $\Delta t$ ) pomnoženo brzinom širenja radio-valova ( $c$ ) daje udaljenost satelita od osmatrača ( $D = r \cdot c$ ) u momentu »T<sub>1</sub>«, koji odgovara momentu emitiranja signala od strane satelita.

Pozicija broda u momentu »T<sub>1</sub>« nalazi se bilo gdje na kružnici, koja se dobija na mjestu presjeka površine zemaljske kugle i kugle sa poluprečnikom »D«, ucrtanom iz pozicije satelita u momentu »T<sub>1</sub>«. Prema tome na osnovu jednog osmatranja satelita ne može se odrediti pozicija broda u vidu tačke.

Ako se hvatanje signala ponovi i izvrši u momentu »T<sub>2</sub>« dobit će se druga kružnica na površini zemaljske kugle. Objе kružnice sjeku se u dvije tačke — »P<sub>1</sub>« i »P<sub>2</sub>« — od kojih je jedna pozicija osmatrača u momentu »T<sub>2</sub>«. Normalno neće biti teškoća u izboru pravilne tačke, ali ako bi nastupila sumnja, dovoljno je pomoću posebne antene (slično kao kod radio-goniometra) odrediti smjer satelita u momentu prijema signala.

Mjerenje vremena mora se vršiti sa tačnošću ispod 1 mikro-sekunde, s tim da greška u pokazivanju satova izme-

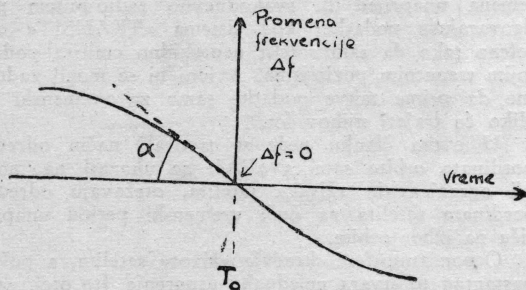
đu dva uzastopna prolaza satelita nad istom tačkom na zemaljskoj kugli bude konstantna i ne prelazi  $10^{-9}$  sekunde.



Princip određivanja pozicija mjerenjem vremena

Navedeni princip korištenja navigacijskih satelita za potrebe brodova i aviona namjerava se primijeniti kod sistema »SEREB«, koji se sada projektuje.

Određivanje pozicija na osnovu Doppler-ovog efekta našlo je svoju primjenu kod američkih navigacijskih satelita tipa »TRANSIT«. Radio-predajnik satelita emitira signale na određenoj frekvenciji, koja mora biti što konstantnija. Zbog relativnog kretanja satelita u odnosu na osmatrača na zemlji, frekvencija koju prima osmatrač mijenja se zavisno od toga da li se satelit približava ili udaljava. U momentu kada je satelit u onoj tački orbite, koja sa spojnicom od osmatrača zaklapa kut od 90 stepeni, promjena frekvencije je nula; ovo je ujedno momenat prolaza satelita na najmanjoj udaljenosti od osmatrača (»T<sub>0</sub>«).



Krivulja promjena primljene frekvencije

Ova daljina »D« određuje se matematskim putem na osnovu slijedećih elemenata: brzine satelita u momentu »T<sub>0</sub>«, brzine širenja radio-valova i kosine krivulje promjene frekvencije »α« u momentu »T<sub>0</sub>«.

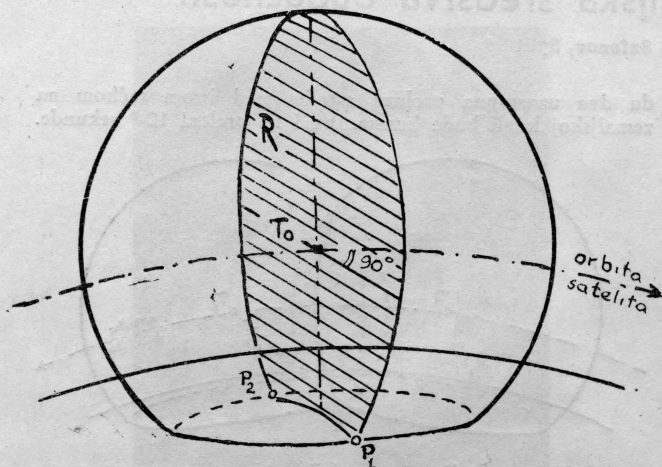
Pozicija broda u momentu »T<sub>0</sub>« nalazi se na jednoj od tačaka »P<sub>1</sub>« i »P<sub>2</sub>«, koje se dobijaju na mjestu presjeka površine zemaljske kugle, kugle sa poluprečnikom »D« ucrtanom iz pozicije satelita u momentu »T<sub>0</sub>« i ravnine »R«, povučenoj okomito na smjer orbite satelita u momentu »T<sub>0</sub>«.

I ovdje redovno neće biti teškoća u izboru pravilne tačke, a u slučaju sumnje postupak je isti kao kod ranije opisanog sistema »SEREB«.

Umjesto korištenja samo centralnog dijela krivulje promjene frekvencije predviđa se u budućnosti primjena cijele krivulje. Na ovaj način bit će omogućeno dobivanje više uzastopnih pozicija broda odnosno aviona u svakom prolazu satelita; kod sadašnjeg načina korištenja Doppler-ovog efekta

moгуće je samo određivanje pozicije u momentu prolaza satelita na najmanjoj daljini, dakle samo jedna pozicija.

Kod oba principa primjene navigacijskih satelita potrebni su na brodu odnosno u avionu posebni automatski elektronski računari, koji trenutno vrše sve potrebne proračune. Ako bi takve proračune vršio čovjek — navigator, to bi zauzelo suviše vremena.



Princip određivanja pozicija pomoću Doppler-ovog efekta

Zahtjev u pogledu tačnog poznavanja koordinata satelita ostaje kod sistema sa Doppler-ovim efektom isti kao kod sistema mjerenja vremena. Prema tome, bez obzira na princip određivanja pozicija, mora se poznavati pozicija satelita sa većom tačnošću od one, koja je potrebna osmatraču za njegovu vlastitu poziciju. Laboratorijska ispitivanja pokazuju da pri dobrom prijemu signala (odnos jačina signala šumovi zbog prirodnih smetnji oko 20 DB) preciznost određivanja pozicija ovisi isključivo o tačnom poznavanju pozicija satelita. Brodovi i podmornice, koje mogu boraviti na otvorenom moru više sedmica morali bi imati odgovarajuće tablice sa pozicijama satelita (»Efemeride«) za duže vremena unaprijed ili svakodnevno radio-putem primiti odgovarajuće podatke; kod sistema »TRANSIT« ovo je riješeno tako da sam satelit neprekidno emitira podatke o svojim trenutnim pozicijama. Avioni bi se mogli zadovoljiti time da prime takve podatke samo za vremenski period koliko će trajati njihov let.

U ovom članku neće se tretirati način određivanja koordinata orbite satelita ali će se ukazati na momente, koji ograničavaju »život« satelita, otežavaju određivanje koordinata satelita za duži vremenski period unaprijed i utiču na izbor orbite.

Otpor atmosfere skraćuje »život« satelita, a pošto nije konstantan to stvara nejednako usporenje, što otežava određivanje koordinata orbite unaprijed — takozvano »prognoziranje«. Uticaj privlačnosti Sunca i Mjeseca je malen ali konstantan, tako da ne otežava prognoziranje. Pritisak sunčeve radijacije je također malen i konstantan (na primjer, kod radio-relejnog satelita »ECHO-I«, koji se prošle godine dobro video golim okom u našoj zemlji, tokom pola godine pritisak sunčeve radijacije promijenio je apogej za oko 480 km, a perigej za oko 570 km).

Najveće promjene orbite nastupaju zbog promjenivosti gravitacije Zemlje, naročito na malim visinama, kao posljedica razlika u debljini (brda, doline) i gustini Zemljine kore. Ovi uticaji još nisu dovoljno ispitani i stvaraju najveće teškoće u prognoziranju koordinata orbite.

Ako se želi postići što preciznije određivanje pozicija brodova i aviona treba da bude orbita što niža. Međutim otpor atmosfere i promjenivosti gravitacije Zemlje ne dozvoljavaju izbor niskih orbite. Ujedno je povoljno da orbita bude po svom obliku što sličnija kružnici, jer se time postižu i manje visine duž cijele orbite.

Danas još nije moguće odrediti koordinate orbite sa potrebnom tačnošću za period od nekoliko mjeseci, pa se to određuje u kraćim vremenskim razmacima. Tako kod

sistema »TRANSIT« prognoziranje se vrši svaka dva dana, što daje pozicije brodova sa greškom oko 0,5 Nm.

Na tačnost pozicija osmatrača utiče i kvalitet prijema radio-signalata satelita. To znači da treba koristiti one frekvencije na kojima ima najmanje prirodnih smetnji, koje nastaju zbog kiše, naoblake, atmosferskog elektriciteta, kozmičkih zraka i sunčevih mrlja; tako dolaze u obzir frekvencije od 100 do 1000 Mc/sek.

Kod satelita, koji služe za određivanje pozicija pomoću Doppler-ovog efekta, mora se prilikom izbora frekvencija voditi računa i o refrakciji radio-talasa zbog ionosfere, koja stvara poremećaje frekvencija. Zbog ove refrakcije potrebno je vršiti korekturu izračunate daljine satelita. Ova korektura nije velika — obično oko 1 Nm — ali nije konstantna, jer ovisi o stanju ionosfere, na koju utiče doba dana i godine, aktivnost Sunca itd. Pošto se refrakcija smanjuje sa povećanjem frekvencije to je korisnije izabrati odgovarajuće frekvencije i na taj način eliminirati potrebu korekture daljine.

Ako se uporede tehnički podaci sistema »TRANSIT« i »SEREB« dobija se slijedeće:

Veličina satelita kod obaju sistema je približno jednaka. Prva četiri satelita tipa »TRANSIT« bila su loptastog oblika sa prečnikom oko 90 cm; peti satelit ovog tipa — »TRANSIT — IV. A« je cilindar sa prečnikom 1 m i visinom 79 cm. Satelit tipa »SEREB« vjerojatno će biti lopta sa prečnikom oko 50 cm. Smanjenje veličine u odnosu na tip »TRANSIT« moguće je iz razloga jer »SEREB« neće imati radio-prijemnik, već samo radio-predajnik, niti elektronsku memoriju.

Težine satelita tipa »TRANSIT« bile su u početku oko 100 kg, a kod »TRANSIT — IV. A« iznosi već samo 79,5 kg. Težina tipa »SEREB« bit će najviše 50 kg, ali se i kod tipa »TRANSIT« očekuje dalje smanjenje težine. Pitanje težine satelita je naročito važno kod izbora rakete, jer čim je satelit lakši tim manja će biti raketa, kojom će se on ubaciti u orbitu.

Oblik orbite kod tipa »TRANSIT« se mijenjao i bio je: kod »TRANSIT-I. B« apogej 766 km i perigej 373 km, kod »TRANSIT — 2 A« apogej 1064 km i perigej 622 km, kod »TRANSIT — III. B« apogej 993 km i perigej 168 km, a kod »TRANSIT — IV. A« apogej 1012 km i perigej 885 km. Za »SEREB« orbita još nije izabrana i razmatraju se dvije alternative — visoka orbita sa perigejem oko 500 km i velikim ekscentricitetom ili niska orbita na visini 500 do 1000 km sa malim ekscentricitetom, t. j. slična kružnici.

Tačnost mjerenja vremena za oba sistema mora biti oko  $10^{-6}$  do  $10^{-8}$  sekunde ako se želi postići tačnost određivanja pozicija na moru sa greškom ispod 300 metara. Takvu tačnost mjerenja vremena već sada daju kvarc-satovi. Za još veću tačnost potrebni su atomski satovi.

Napajanje električnom energijom kod obaju sistema vrši se iz nikel-kadmijevih odnosno cink-srebrnih baterija, ali i pomoću foto-čelija, koje pretvaraju Sunčevu energiju u električnu. Kod »TRANSIT — IV. A« napajanje se vrši pored toga pomoću radio izotopnog termo-električnog generatora »SNAP« (System for Nuclear Auxiliary Power), koji koristi plutonij 238. Ovaj generator teži svega 2 kg, daje 2,5 W električne struje i može raditi neprekidno nekoliko decenija; ako bi se umjesto ovog generatora koristile konvencionalne baterije bila bi njihova težina najmanje 3,5 tone.

Posebno pitanje je koliko satelita je potrebno da se uspostavi svjetska navigacijska mreža. Bez obzira na sistem satelita smatra se da bi kod orbite sa prosječnom visinom 500 km bilo potrebno najmanje 6 satelita, s tim da bi orbite zaklapale sa Zemljinim ekvatorom uglove 15, 45 i 75 stepeni. Ovo bi omogućilo da se na svakoj tački Zemaljske kugle izvrši 12 osmatranja dnevno. Kod orbite na visini 900 km dovoljna bi bila 4 satelita sa polarnim orbitama, međusobno razmaknutim za 90 stepeni; ovo bi omogućilo osmatraču na ekvatoru određivanje pozicija 16 puta dnevno a osmatraču na većoj geografskoj širini i više puta. Ovakav broj osmatranja dnevno je potpuno dovoljan za brodove, ali vjerovatno bi bio premalen za avione. Za njih bi se morala mreža satelita povećati.

Svjetska mreža satelita morala bi se povremeno obnavljati, jer se očekuje da bi »život« satelita na visini preko

500 km mogao da traje svega 1? do 24 mjeseca. Osim toga treba računati s tim da će na nekim satelitima dolaziti do kvarova na uređajima (kod »TRANSIT-I. B« radio-predajnik prestao da radi poslije 3 mjesca usljed kvara u napajanju) i to će takođe biti razlog obnavljanju, t. j. lansiranju novog satlita, jer popravak satelita u orbiti ne dolazi u obzir.

Danas iznad zemlje kruže isključivo sateliti tipa »TRANSIT«, koji se izrađeni specijalno za potrebe ratne mornarice SAD prvenstevno njenih atomskih podmornica sa raketama »Polaris«. Ali treba očekivati da će u doglednoj budućnosti navigacijski sateliti služiti i za mirnodopske potrebe brodova i aviona.