

UDK 528.021.7

528.061

Pregledni rad

METEOROLOŠKA KOREKCIJA KOD MERENJA DUŽINA ELEKTROOPTIČKIM DALJINARIMA

*Živomir LALOVIĆ — Beograd**

1. UVOD

Opšte je poznato šta u današnjoj geodeziji znači upotreba elektromagnetskih odnosno elektrooptičkih daljinara. Sa njima se mogu brže, efikasnije i tačnije rešavati geodetski zadaci. Činjenica da nosilac informacije, elektromagnetski talas, prolazi kroz realnu sredinu a ne kroz vakum unosi ograničenja u pogledu iskorišćenja mogućnosti koje oni po sebi nose. Još od najranije primene radio i elektrooptičkih daljinara bila je očigledna važnost pravilnog uzimanja u obzir meteoroloških parametara sredine. Došlo se do više načina rešavanja ovoga problema.

Stvaranje meteoroloških modela prizemnog sloja atmosfere za razne vremenske prilike predstavlja jedan od načina da se uticaj sredine na prostiranje elektromagnetskih talasa a samim tim i na rezultate merenja uzima u obzir. Merenje meteoroloških parametara na većem broju tačaka ili duž cele dužine koju merimo predstavlja takođe način da se odredi uticaj sredine na domet i rezultate merenja. Isto tako postoje metode rada kod kojih su u izravnanju nepoznate ne samo geodetske veličine nego i njihove meteorološke korekcije. Jedan od perspektivnih načina su merenja sa talasima različite talasne dužine i na taj način određivanja uticaja parametara sredine na rezultate merenja.

Na ovom mestu biće razmatrani neki pojmovi koji se javljaju kod uzimanja u obzir meteoroloških parametara, kao i praktična računanja meteorološke korekcije kada se meteorološki parametri mere.

2. BRZINA PROSTIRANJA ELEKTROMAGNETSKOG TALASA

Bitan parametar kod merenja dužina elektromagnetskim daljinarima je brzina prostiranja elektromagnetskog talasa. Brzina prostiranja talasa u vakumu je $c_0 = 299\,792\,458 \pm 1,2$ m/sek. Ova brzina (brzina svetlosti) je usvojena od Međunarodne geodetske i geofizičke unije u Grenoblu 1975. godine.

* Adresa autora: Živomir Lalović, Institut za geodeziju, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar revolucije 73

U realnim sredinama u kojima se inače obavljaju merenja dužina brzina mernog talasa je data relacijom:

$$V = \frac{c_0}{n}, \quad (1)$$

gdje je n -indeks prelamanja sredine.

Izraz za indeks prelamanja je u opštem slučaju složen, ali se za praktične potrebe sa dovoljnom tačnošću može izraziti [4]:

$$n = \sqrt{\epsilon_r}, \quad (2)$$

gdje je ϵ_r relativna dielektrična konstanta koja se može odrediti iz odnosa [4]:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

kada se ima dielektrična konstanta posmatrane sredine ϵ i ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma čija je vrednost $8,855 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$.

Zavisnost relativne dieletrične konstante vazduha (ϵ_r) od atmosferskih parametara (temperature, pritiska i vlažnosti) ima za posledicu zavisnost indeksa prelamanja odnosno brzine prostiranja talasa od ovih parametara. No pre nego što pređemo na samu vezu koja postoji između ovih veličina potrebno je reći nešto više o nekim pojmovima koji se pri ovome susreću.

Kod prostiranja moduliranog talasa kroz disperzivnu sredinu javljaju se dva pojma brzine. Brzina prostiranja faze date izrazom [6]:

$$V = \frac{c_0}{\epsilon_r}. \quad (4)^*$$

Pored fazne brzine postoji i brzina koju je moguće meriti i kojom se prenosi energija t.z.v. grupna brzina V_g . Veza fazne i grupne brzine u realnim sredinama može se izraziti relacijom [6]:

$$V_g = \frac{V}{1 - \frac{\omega}{v} \frac{dv}{d\omega}}, \quad (6)$$

gdje je ω kružna učestanost posmatranog talasa, dok je $\frac{dv}{d\omega}$ prvi izvod fazne brzine po kružnoj učestanosti. Iz ovoga izraza očigledno je da kada fazna brzina ne zavisi od učestanosti $\left(\frac{dv}{d\omega} = 0\right)$ tada je grupna brzina jednaka faznoj ($V_g = V$).

* Kako imamo sredine za koje ϵ_r može biti manja od jedinice dobija se da brzina prostiranja faze može biti veća od brzine svetlosti. Jasno je da ovo sa gledišta fizike nije moguće. Brzina prostiranja faze ne predstavlja realnu (moguću) brzinu kojom se prostire elektromagnetska energija kroz sredinu već je to čisto kinematska veličina vezana za idealni prostoperiodični talas (monohromatski), bez početka i kraja i zbog toga je nemoguće zamisliti fizički eksperiment kojim bi se ona mogla izmeriti direktno. Stoga ostaje da se fazna brzina shvati kao odnos talasne dužine λ , merene u određenoj sredini i periode talasa T : $V = \frac{\lambda}{T}$

Brzina kojom se prostire talas kod merenja dužina elektromagnetskim daljinarima je grupna brzina. Razlog za uvođenje grupne brzine je višestruk. Razmotrićemo dva čiji je uticaj najdominantniji.

2.1. Spektar nastao od emisijomog izvora

Kod daljinara kod kojih izvor nosećeg talasa ne daje monohromatski talas već spektar kao što je slučaj kod Ga-As diode (naviše primenjivanog izvora kod daljinara srednjeg dometa) desiće se da talasi različite talasne dužine imaju međusobom različite fazne brzine. Da bi se u ovom slučaju definisala brzina kojom se može opisati uvodimo grupnu brzinu odnosno koristeći relaciju (1) grupni indeks prelamanja.

Da bismo došli do relacije koja nam daje vezu između grupnog indeksa prelamanja n_g i talasne dužine λ odnosno λ_e koristićemo indeks prelamanja dat za monohromatski talas [4]:

$$n = 1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (7)$$

gde su A, B i C koeficijenti Barela i Sirsa, a λ talasna dužina monohromatskog talasa. Ako se talasna dužina izrazi u nanometrima koeficijenti imaju vrednost: $A = 2876,04 \cdot 10^{-7}$, $B = 1,6288$ i $C = 13600$. Iz izraza (7) je očigledno da će zavisnost indeksa prelamanja kod radio talasa od talasne dužine biti zanemarljiva.

Veza indeksa prelamanja nemonohromatskog talasa i talasne dužine ostvaruje se uz uvođenje pojma efektivne talasne dužine λ_e . Ova talasna dužina treba da reprezentuje spektar čija nas brzina prostiranja interesuje. Određivanje grupne brzine kao srednje (vrednosti) brzine dobijene iz talasa koji čine spektar nije ispravno. Zavisnost brzine od talasne dužine nije linearna, stoga se jednostavno osrednjavanje vrednosti nemože primeniti. Veza fazne i grupne brzine i efektivne talasne dužine data je izrazom [4]:

$$V_g = V - \lambda_e \frac{dv}{d\lambda_e}. \quad (8)$$

Kako nas interesuje grupni indeks prelamanja n_g to iz relacije (8) lako možemo preći na relaciju [4]:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (9)$$

Kada u ovaj izraz uvrstimo relaciju (7) dobićemo:

$$n_g = 1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \lambda \frac{d}{d\lambda} \left(1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \right). \quad (10)$$

Ako umesto λ stavimo λ_e dobićemo sa zadovoljavajućom tačnošću izraz za grupni indeks prelamanja:

$$n_{ge} = 1 + A + \frac{3B}{\lambda_e^2} + \frac{5C}{\lambda_e^4}, \quad (11)$$

odnosno

$$n_{gc} = 1 + A + \frac{B_1}{\lambda_e^2} + \frac{C_1}{\lambda_e^4},$$

gde su:

$$A = 2876,04 \cdot 10^{-7},$$

$$B_1 = 4,8864,$$

$$C_1 = 68 \cdot 10^3,$$

kada se λ_e izrazi u nanometrима.

Efektivna talasna dužina se računa kao srednja vrednost iz talasnih dužina spektra odnosno spektar se zamenjuje kvazi monohromatskim talasom talasne dužine λ_e . Kako je spektar koji se emituje relativno uzak, λ_e se određuje sa tačnošću ± 1 nm a tome odgovara greška indeksa prelamanja oko $2 \cdot 10^{-6}$.

2.2. Spektar nastao u procesu modulacije

Drugi razlog zbog koga uvodimo pojam grupne brzine jeste posledica modulacije nosećeg talasa. Da bi se prostoperiodičnim talasom mogla preneti neka informacija on mora biti na neki način modulisan (amplitudno, impulsno, fazno ili frekvenciski) ali samim tim prostoperiodičan talas prestaje da bude prostoperiodičan. Postupkom modulacije stvara se u opštem slučaju grupa frekvencija zbijenih oko noseće frekvencije a brzina prostiranja faze postaje funkcija frekvencije. Slaganjem prostoperiodičnih komponenata formira se modulaciona anvelopa koja u sebi sadrži informaciju koju želimo da prenesimo ali se ona u realnoj sredini prostire grupnom brzinom.

Kod elektrooptičkih daljinara, kod kojih se dužina meri posredstvom merenja razlika faza modulisanog talasa, vrši se (pretežno) amplitudska modulacija. Modulisan talas ima oblik:

$$F(t) = [A + a \sin(\omega t + \varphi_0)] \sin(\Omega t + \psi_0) \quad (12)$$

gde je:

A — amplituda nosećeg talasa,

a — amplituda modulacionog talasa,

ω — kružna učestanost modulacionog talasa,

Ω — kružna učestanost nosećeg talasa,

φ_0 — početna faza modulacionog talasa,

ψ_0 — početna faza nosećeg talasa.

Ako izraz (12) predstavimo u kompleksnom obliku imaćemo:

$$\bar{F}(t) = \left(\bar{A} + \bar{a} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \right) \left(\frac{e^{j\Omega t} - e^{-j\Omega t}}{2j} \right). \quad (13)$$

Početnu fazu modulacionog talasa φ_0 i početnu fazu nosećeg talasa ψ_0 zbog jednostavnosti uzećemo jednakim nuli. Ako odnos amplituda nosećeg i modulacionog talasa označimo sa m odnosno:

$$\frac{\bar{a}}{A} = m$$

i to uvrstimo u relaciju (13) posle elementarnih transformacija i vraćanja sa kompleksnog domena na realni dobijamo:

$$F(t) = A \left\{ \sin \Omega t + \frac{m}{2} \sin \left[\left(\Omega + \omega \right) t + \frac{\bar{u}}{2} \right] - \frac{m}{2} \sin \left[\left(\Omega - \omega \right) t + \frac{\bar{u}}{2} \right] \right\}. \quad (14)$$

Iz ovoga izraza je očigledno da će modulirani talas imati pored komponente čija je učestalost Ω i komponentu učestanosti $\Omega + \omega$ i $\Omega - \omega$. Drugim rečima imaćemo spektar nastao u procesu modulacije. Ako sada uzmemo da je noseći talas emitovan od Ga-As diode sa učestanošću red veličine 10^{14} Hz a da je modulaciona frekvencija red 10^7 Hz lako se dolazi do zaključka da za praktična računanja indeksa prelamanja kao funkcije talasne dužine (11) nema značaja dali računamo sa talasnom dužinom čija je učestanost Ω ili $\Omega + \omega$ ili $\Omega - \omega$. Drugim rečima spektar nastao u procesu amplitudske modulacije ima zanemarljivo malu širinu tako da se računanje indeksa prelamanja može smatrati kao da je u pitanju prostoperiodičan talas odnosno može se koristiti relacija (11).

3. ZAVISNOST INDEKSA PRELAMANJA OD METEOROLOŠKIH PARAMETARA

Ova veza se može dobiti od izraza za dieletričnu konstantu [4]:

$$\varepsilon_r = 1 + k_1 \frac{p}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (15)$$

gde su k_1 , k_2 i k_3 koeficijenti koji se uglavnom mogu eksperimentalno odrediti, dok su p vazdušni pritisak, T temperatura i e pritisak vodene pare.

Prvi član u relaciji (15) karakteriše uticaj na dieletričnu konstantu pomaka molekula suvog vazduha pod uticajem spoljnog elektromagnetskog polja. Drugi član uzima taj efekat za molekul vode. Treći član održava uticaj promene orijentacije molekula vode na dielektričnu konstantu.

Koristeći vezu između indeksa prelamanja i relativne dielektrične konstante (2) dolazimo do ove veze između grupnog indeksa prelamanja i meteoroloških parametara. Ova relacija se može napisati u sledećem obliku:

$$n_g = 1 + \frac{1}{1 + \alpha t} \left[(n_g^c - 1) p M_1 - e M_3 \right], \quad (16)$$

gde je:

$$M_1 = 9,869 \cdot 10^{-4},$$

$$M_2 = 4,125 \cdot 10^{-8},$$

ako se pritisak (p) i pritisak vodene pare (e) izraze u milibarima

$$M_1 = 9,869 \cdot 10^{-6},$$

$$M_2 = 4,125 \cdot 10^{-10},$$

ako se p i e izraze u Paskalima (Pa)

$$M_1 = 13,158 \cdot 10^{-4},$$

$$M_2 = 5,5 \cdot 10^{-8},$$

ako su p i e izraženi u mmHg (jedinica je van upotrebe od 31. 12. 80). U sva tri slučaja $\alpha = 36,609 \cdot 10^{-4}$ a temperatura se uzima u °C.

4. RAČUNANJE METEOROLOŠKE POPRAVKE ZA ELEKTROOPTIČKE DALJINARE

Računanje meteorološke popravke za merenu dužinu vrši se računanjem triju indeksa prelamanja i to n_{ge} iz relacije (11) za odgovarajuću talasnu dužinu (datu od strane proizvođača daljinara), indeks prelamanja n_{g0} koristeći relaciju (16) i to za meteorološke parametre za koje je korekcija nula i indeksa prelamanja n_{gi} za svaki konkretni slučaj odnosno za meteorološke parametre pri kojima su merenja dužina vršena.

Izmerenu dužinu treba pomnožiti odnosom $\frac{n_{g0}}{n_{gi}}$ i dobiće se dužina korigovana za uticaj meteo parametara. Ukoliko želimo da ovu popravku predhodno sračunamo, pa zatim korigujemo merenu dužinu koristićemo se izrazom $\frac{n_{g0}}{n_{gi}} - 1$.

Kako je n_{g0} vrednost koja se za svaki daljinar može unapred sračunati, to se odnos $\frac{n_{g0}}{n_{gi}}$ može dati u obliku:

$$\frac{n_{g0}}{n_{gi}} = \frac{n_{g0}}{1 + \frac{1}{1 + \alpha t_i} (Ne p_i M_1 - e_i M_2)}, \quad (17)$$

gde je $Ne = n_{ge} - 1$.

Ovaj izraz možemo dovoljno tačno napisati i u obliku:

$$\frac{n_{g0}}{n_{gi}} = n_{g0} - \frac{n_{g0}}{1 + \alpha t_i} (Ne p_i M_1 - e_i M_2). \quad (18)$$

Na isti način možemo izraziti i popravku $\left(\Delta C = \frac{n_{g0}}{n_{gi}} - 1 \right)$:

$$\Delta C = n_{g0} - 1 - \frac{n_{g0}}{1 + \alpha t_i} (Ne p_i M_1 - e_i M_2). \quad (19)$$

U tabeli 1 dati su grupni indeksi prelamanja kao i korekcije za daljinare koji se kod nas danas najviše koriste.*

* Autoru je prijatna dužnost da zahvali profesoru dr N. Solariću za podsticajne razgovore koje je sa njim imao.

Tabela 1

Vrsta daljinara	Nulti meteo parametri			Efektivna talasna dužina nm	Efektivni (grupni) indeks	Indeks prelamanja za nulte meteorološke parametre	Meteorološka korekcija C u mm/km (p i e izraženi u milibarima a t u u °C)
	Temperatura	Pritisak mb	Vlažnost mb				
KERN DM-500 DM-501* DM 502	12			875	1,000 294 10	1,000 281 72	$281,7 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2902 p - 0,041 e)$
	12	1013,25	0				
	15	987	13				
EOT 2000				860	1,000 294 34	1,000 271 28	$271,3 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2906 p - 0,041 e)$
WILD Di 10, Di 3				875	1,000 294 10	1,000 281 72	$281,7 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2903 p - 0,041 e)$
Di 3s, Di 4, TCl	12	1013,25	0	885	1,000 293 95	1,000 281 57	$281,5 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2902 p - 0,041 e)$
Di 4L, TClL, Di 20				835	1,000 294 75	1,000 282 34	$282,3 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2910 p - 0,041 e)$
Geodimeter 10,12	20	1013,25	0	910	1,000 293 60	1,000 273 58	$273,6 - \frac{1}{1+0,00366t} (0,2898 p - 0,041 e)$

* U prospektu koji je dat od firme Kern formula za meteorološku korekciju nije ispravno data.

LITERATURA:

- [1] Jordan-Eggert-Kneissl: »Handbuch der Vermessungskunde« (prevod na ruski), Nedra, Moskva, 1970.
- [2] Kahmen, H.: Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie, Karlsruhe, 1977.
- [3] Kontić, S.: Elektronsko merenje dužina, Beograd, 1972.
- [4] Lobačev, V. M.: Radioelektronaja geodezija, Moskva, Nedra, 1980.
- [5] Miheečev, V. S.: Geodezičeskie svtodalinomerii, Moskva, Nedra, 1979.
- [6] Surutka, J.: Elektromagnetika, Građevinska knjiga, Beograd, 1966.

REZIME

Posle definisanja pojmova: grupna brzina, grupni indeks prelamanja i efektivna talasna dužina koji se javljaju kod elektronskog merenja dužina izvedene su njihove zavisnosti od atmosferskih veličina. Takođe je dat pregled grupnih indeksa prelamanja i formule za atmosfersku korekciju kod infracrvenih daljinomera za kratka odstojanja a za nekoliko firmi.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach einer Erklärung der Begriffe: Gruppengeschwindigkeit, Gruppenbrechungsindex und effektive Wellenlänge, die bei der elektronischen Streckenmessung vorkommen, wurden ihre Zusammenhänge mit den atmosphärischen Größen abgeleitet. Es wird auch einen Übersicht von Gruppenbrechungsindizes sowie von Formeln für die atmosphärische Korrektur bei den Infrarot-Distanzmessern für Nahbereich einiger Firmen, angegeben.

Primljeno: 1983-10-24