

UDK 528.021.7+528.517  
Pregledni rad

## PROBLEMI MJERENJA DULJINA VISOKOM TOČNOSTI ELEKTROOPTIČKIM DALJINOMJERIMA

Dušan BENČIĆ, Nikola SOLARIĆ, Zlatko LASIĆ — Zagreb\*

### 1. UVOD

Mjerenje duljina elektrooptičkim daljinomjerima danas je u geodeziji najtočniji način mjerenja duljina, ako izuzmemo mjerenja primjenom interferencije svjetlosti (koja zahtijevaju izuzetno skupu opremu)\*\* [10].

Elektrooptički daljinomjeri imaju vrlo široku praktičnu primjenu. Bez poteškoća moguće je njima mjeriti duljine u širokom rasponu. Duljine do 11 km mjere se sa srednjim pogreškama unutar  $\pm 10$  mm, a što je prije i s preciznim optičkim daljinomjerima bilo nemoguće. Pri mjerenjima duljina visokom točnosti elektrooptičkim daljinomjerima smatramo da srednja pogreška mjerenja ne smije biti veća od  $\pm(1 \text{ mm} + 1 \text{ pm})$ \*\*\*. Tako visokim zahtjevom za točnošću značajno se povećava broj različitih faktora koji utječu na točnost mjerenja, pa je potrebno njihovo poznavanje i svestrana analiza, naročito uzmemo li u obzir da u bližoj budućnosti želimo doseći veličine relativnih pogrešaka mjerene duljine manje od  $0,5 \cdot 10^{-7}$ .

Kao što je poznato fizikalni princip elektroničkog mjerenja duljina zasniva se na mjerenju vremena koje je potrebno elektromagnetskom valu za dvostruki prelaz mjerene duljine — od instrumenta do reflektora na cilju i natrag [4], [11], [12], [19], [24]. Uz pretpostavku da se elektromagnetski val širi pravocrtno konstantnom brzinom  $c$ , slijedi osnovna formula za određivanje duljine:

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t = K \cdot t,$$

gdje je  $t$  vrijeme potrebno mjernom signalu da prijeđe dvostruku duljinu od daljinomjera do reflektora  $2D$ , a  $K = (1/2) \cdot c$  je multiplikaciona kon-

\* Prof. dr. Dušan Benčić, prof. dr. Nikola Solarić, mr. Zlatko Lasić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26.

\*\* Iako su danas mjerenja duljina preciznim elektrooptičkim daljinomjerima postala preciznija, nego mjerenja invarskim žicama još uvijek je preporučljivo kalibracijske baze za elektrooptičke daljinomjere izmjeriti na više različitih načina (elektrooptičkim daljinomjerima, interferencijom svjetlosti i invarskim žicama) i rezultate postignute različitim metodama međusobno komparirati.

\*\*\*  $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$  D, gdje je D mjerena duljina.

stanta. Ovoj formuli moramo dodati adicijonu konstantu  $k$  uzrokovanu u prvom redu gradom daljinomjera i reflektora. Time dolazimo do poopćenja formule za duljinu poznate u optičkom mjerenju duljina, a koja glasi:

$$D = K \cdot l + k$$

Svako mjerenje i račun duljine karakterizirani su, dakle, dvijema konstantama: multiplikacionom i adicijonom, dok je veličina  $l$  promjenjiva mjerena veličina ovisna o duljini. U slučaju elektroničkog mjerenja duljina to je vremenski interval  $t$  puta signala. Kao što je iz teorije optičkog mjerenja duljina poznato, netočnost multiplikacione konstante utječe to više, što je mjerena duljina veća, a nepoznavanje ili netočnost adicijone konstante značajnije utječe na relativnu točnost kraće duljine. Prema tome upoznavanjem i analizom ovih konstanti u elektrooptičkih daljinomjera spoznat ćemo i osnovnu problematiku mjerenja duljine visokom točnosti elektrooptičkim daljinomjerima.

Princip elektroničkog mjerenja duljina vrlo je jednostavan, no u konstruktivnim rješenjima i tehničkoj izvedbi to je vrlo složen način mjerenja [25]. Razlog tome je u prvom redu ogromna brzina širenja elektromagnetskih valova koji već u vremenu jedne mikrosekunde prelaze oko 300 m. Npr. pri dvostrukom prelazu duljine 500 m vremenski interval signala je  $\cong 3\mu\text{s}$ , pa već pogreška u mjerenju vremena desetine nanosekunde ( $10^{-10}$  s) uzrokuje pogrešku ove duljine 1,5 cm. Očito je, koliko je izuzetno visokom točnošću nužno mjeriti vremenski interval  $t$  pri preciznim mjerenjima duljine.

Osim mjerenja vremenskog intervala potrebno je vrlo točno poznavanje multiplikacione konstante, a to znači brzine signala tj. svjetlosti u toku mjernog procesa. Tu se pojavljuju novi značajni problemi pri mjerenjima visokom točnosti. Uz poznatu brzinu  $c_0$  elektromagnetskog vala u vakuumu dobivamo brzinu vala  $c$  u optičkom sredstvu određene gustoće na osnovi poznatog zakona iz optike:

$$c = \frac{c_0}{n},$$

gdje je  $n$  indeks loma optičkog sredstva.

Slijedi:

$$K = \frac{c_0}{2n}.$$

Već određivanje konstantne veličine  $c_0$  nije bilo jednostavno i zahtijevalo je brojna izuzetno precizna mjerenja. Da bi se ova veličina na jednaki način koristila na međunarodnom nivou, danas imamo preporuku XV. Generalne konferencije za mjere i utege, da se kao reprezentativna brzina elektromagnetskih valova upotrebljava:

$$c_0 = 299\,792\,458 \cdot (1 \pm 4 \cdot 10^{-9}) \text{ m/s}.$$

Ona je u definiciji prihvaćena kao konstanta per definitionem, tj. kao bespogrešna. Na osnovi ove brojčane veličine definirana je 1983. godine i jedinica za duljinu 1 m [1].

## 2. UTJECAJ ATMOSFERE

Za određivanje multiplikacione konstante potrebno je osim veličine  $c_0$  poznavati i indeks loma svjetlosti zračnih slojeva atmosfere. No tu se nailazi na posebne probleme, budući da konstantni indeks loma postoji samo u izotropnom optičkom sredstvu a atmosfera je složeni medij s mjestimično i vremenski varijabilnom gustoćom. Očito je, da će utvrđivanje multiplikacione konstante, a time i točnost mjerenja bitno ovisiti o tome koliko je poznato stvarno stanje atmosfere, tj. koliko točno mjerenim podacima određujemo indeks loma zračnih slojeva kroz koje mjerni signal prolazi, ili bolje rečeno, koliko je određena vrijednost indeksa loma reprezentativna [29], [17]. Uz rješavanje tehničkih problema danas je određivanje srednjeg indeksa loma, a time i realne brzine  $c$  elektromagnetskog vala centralni problem preciznog elektroničkog mjerenja duljina. H. Kahmen s pravom kaže, da je nepoznato stvarno stanje atmosfere osnovni ograničavajući faktor točnosti mjerenja elektroničkim daljinomjerima.

Naša iskustva pri mjerenju kalibracijske baze preciznim elektrooptičkim daljinomjerom KERN MEKOMETAR 5000 također potvrđuju da je glavni ograničavajući faktor točnosti mjerenja duljine određivanje reprezentativne temperature duž putanje svjetlosti (rad je u pripremi za tisak).

Indeks loma zraka u osnovi se određuje mjerenjem triju meteoroloških parametara o kojima ovisi gustoća zračnog sloja, a to su: temperatura  $T$ , tlak zraka  $p$  i količina vodene pare u zraku koja se mjeri parcijalnim tlakom  $e$  vodene pare. Ovi se parametri mjere najčešće na jednom mjestu — stajalištu instrumenta, no pri mjerenju visokom točnosti ili na većim duljinama potrebno je mjerenja izvršiti i na cilju, a i na karakterističnim međutočkama. Na osnovi izmjerenih parametara računa se reprezentativni indeks loma zraka (tzv. grupni indeks loma) prema preporučenim empiričkim formulama (npr. Edlen, Barrel i Sears) [3], [5], [29]. Kako su daljinomjeri baždareni na određeno stanje atmosfere karakterizirano s tri parametra, to se mora na temelju izmjerenih parametara stanja atmosfere za vrijeme mjerenja duljine korigirati multiplikaciona konstanta. Na osnovi unošenja podataka u memoriju mikroprocesora putem korekturnog ppm-podatka, najčešće dubive-nog iz grafikona, korekcija duljine se vrši automatski. U nekih elektrooptičkih daljinomjera visoke točnosti (npr. GEOMENSOR CR204) uzimaju se podaci za temperaturu i tlak zraka na stajalištu instrumenta automatski, a unose se u memoriju podaci za relativnu vlagu zraka u % i visinsku razliku instrumenta i reflektora u m (umjesto mjerenja tlaka zraka na cilju). Novina je i primjena vanjskih meteoroloških transmitera koji se postavljaju na međutočke i točku cilja u svrhu mjerenja temperature. To su male kazete s ugrađenim sensorima i antenama duljine 70 cm postavljenim horizontalno i okomito na duljinu, koje odašilju podatke telemetrički instrumentu. Na osnovi ovih podataka sva računanja i korekcije izvodi računalo [21].

Pogreška duljine  $\Delta D$  u ovisnosti o pogrešno primjenjenim ili promjenjenim atmosferskim parametrima može se za svjetlosne valove izraziti pomoću empirijske formule koja vrijedi u ograničenom području temperature, tlaka zraka i tlaka vodene pare:

$$\Delta D = (-1,0 \Delta t + 0,29 \Delta p - 0,038 \Delta e) \cdot 10^{-6} D,$$

za  $\Delta t$  u  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta p$  i  $\Delta e$  u mbar,  $D$  u mm.

To znači da npr. promjena ili nesigurnost temperature zraka  $\Delta t = 1^{\circ}\text{C}$  uzrokuje u elektrooptičkih daljinomjera pogrešku duljine  $\Delta D = 1 \text{ mm/km}$  (1 ppm), tlaka zraka  $\Delta p = 1 \text{ mbar}$  pogrešku duljine  $\Delta D = 0,3 \text{ mm/km}$ , a tlaka vodene pare  $\Delta e = 10 \text{ mbar}$  pogrešku duljine  $\Delta D = 0,4 \text{ mm/km}$ . Utjecaj vlage zraka, kako vidimo, znatno je manji, no pri mjerenjima visokom točnosti potrebno je mjeriti i tlak vodene pare u koju svrhu služe psihometri. Sumarno možemo zaključiti da na osnovi mjerenih parametara srednji indeks loma zraka treba procijeniti s nesigurnošću 0,3% kako bi se postigla relativna pogreška duljine  $10^{-6}$  (1 ppm). To znači, da pri mjerenjima visokom točnosti nesigurnost indeksa loma mora biti unutar ove veličine, što ukazuje na značajnu problematiku utjecaja atmosfere na točnost mjerenja i nužnost visoke stručnosti u ocjeni pri mjerenjima atmosferskih parametara u svrhu određivanja reprezentativnog indeksa loma. Ponovno naglasimo, da se pri razmatranju utjecaja atmosfere ne radi samo o netočnosti mjerenja parametra atmosfere, već posebno o nepoznavanju njihovih veličina duž čitavog puta mjernog signala. Kako se time određuje multiplikaciona konstanta, to su problemi na većim duljinama izrazitiji. Ispitivanja su pokazala, da je problematika utoliko složenija, jer utjecaj imaju i neobuhvatljive vremenske okolnosti, kao npr. mješanje zračnih slojeva uslijed insolacije tla i konvekcije topline, a to uzrokuje pogreške mjerenja duljine elektroničkim daljinomjerima [21]. Utjecaj atmosfere je utoliko složeniji, što prolazom kroz atmosferu dolazi do apsorpcije energije signala i time njegova slabljenja, kao i zakrivljenosti putanje signala uslijed refrakcije kroz slojeve različite gustoće, što može uzrokovati signifikantne pogreške pri mjerenju većih duljina.

### 3. KONSTRUKTIVNI PROBLEMI

Dva su osnovna načina mjerenja duljina elektrooptičkim daljinomjerima: impulsni i fazni.

Pri impulsnom načinu mjerenja odašiljač u vrlo kratkom vremenskom intervalu odašilje impuls svjetlosti do pasivnog reflektora na cilju koji ga vraća prijemniku [7], [8], [9], [25]. U načelu duljinu je moguće mjeriti odašiljanjem jednog jedinog impulsa, no zbog povećanja točnosti mjerenja odašilje se slijed impulsa. Mjerenje duljine svodi se na direktno mjerenje vremenskog intervala  $t$  u kojem impuls dva puta prelazi mjerenu duljinu. S tehničke strane bilo je teško realizirati ovaj način mjerenja u geodeziji zbog izrazitih problema u postizavanju visokih točnosti mjerenja vremenskog intervala ( $\pm 10^{-10}$  s i točnije). Toliko visoke točnosti nije bilo moguće postići jednostavnim elektroničkim sklopovima, nego samo specijalnim brzim sklo-

povima. Znanstvenotehnički napredak posljednjih godina s novim tehničkim rješenjima omogućio je novi razvoj i primjenu impulsnih daljinomjera s točnostima mjerenja reda veličine mm (npr. FENNEL FEN2000, WILD DI3000). O razvoju novih impulsnih daljinomjera vidi [25].

Impulсни način mjerenja imat će u budućnosti pri mjerenju kratkih duljina značajnu primjenu zbog izrazitih prednosti. Za mjerenja visokim točnostima impulsnim daljinomjerima nužno će biti i dalje povećanje točnosti mjerenja vremenskog intervala i skraćenje trajanja impulsa, a tehnologije koje to omogućavaju su u razvoju (radi se o tehnologiji koja omogućuje mjerenja vremena u pikosekundama, tj.  $10^{-12}$  s). Isto tako je od značenja daljnje povećanje stabilnosti frekvencije oscilatora.

Dosadašnjim razvojem elektroničkog mjerenja duljina primjenjen je za geodetska mjerenja većinom fazni način mjerenja duljine, zbog navedenog problema direktnog mjerenja vremenskog intervala visokim točnostima. Pri faznom načinu mjerenja vremenskog intervala odabran je posredni način na osnovi mjerenja fazne razlike odaslanog i primjenog vala. Po tome i naziv ovog načina mjerenja. Pri faznom načinu mjerenja duljine elektrooptičkim daljinomjerima odašiljač emitira modulirane svjetlosne valove do pasivnog reflektora na cilju koji ih vraća do prijemnika na početnoj točki dužine. Mjereni vremenski interval možemo rasčlaniti na slijedeći način:

$$t = NT + \Delta NT,$$

gdje je  $N$  cijeli prirodni broj,  $T$  perioda, tj. vrijeme jednog titraja moduliranog vala, a  $\Delta N$  ima vrijednost između 0 i 1. Time je ukupno vrijeme puta modulacijskog signala jednako ukupnom broju perioda titraja i vremenskog ostatka unutar jedne periode, a koje se mjeri na osnovu fazne razlike. Uvrstimo li ovaj izraz u osnovnu formulu elektroničkog mjerenja duljina, dobit ćemo:

$$2D = ct = cT \cdot (N + \Delta N).$$

Kako je umnožak brzine signala i periode jednak valnoj duljini  $\lambda$  moduliranog vala, to će formula za fazno elektroničko mjerenje duljine glasiti:

$$D = (N + \Delta N) \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Veličinu  $\lambda/2$  nazivamo mjernom jedinicom. U većine konstrukcija iznosi 2 do 30 m. Fazno elektroničko mjerenje možemo figurativno usporediti s mjerenjem duljine pomoću vrpce ili lanca. Duljina »vrpce« je mjerna jedinica, a instrumentom mjerimo broj »vrpaci« i ostatak  $\Delta N \lambda/2$ . Ovaj se ostatak određuje mjerenjem fazne razlike. Očito je, da je mjerna jedinica multiplikaciona konstanta faznih daljinomjera, pa će o egzaktnom poznavanju mjerne jedinice i njenoj stabilnosti značajno ovisiti točnost mjerenja faznim elektrooptičkim daljinomjerima. Prema osnovnim zakonima fizike mjerna jedinica će biti data izrazom:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{c_0}{2nf}$$

gdje je  $c$  brzina valne grupe,  $f$  mjerna frekvencija moduliranog vala,  $c_0$  brzina valova u vakuumu,  $n$  indeks loma optičkog sredstva. Prema tome, mjerna jedinica ovisi značajno o indeksu loma, te o frekvenciji moduliranog vala. Problematiku poznavanja indeksa loma, a time i utjecaja atmosfere već smo upoznali. Frekvencija moduliranog vala osnovna je tehnička karakteristika faznih daljinomjera, pa će o njenoj stabilnosti ovisiti točnost mjerenja ovim daljinomjerima.

Pri mjerenjima visokom točnosti problem stabilnosti mjerne frekvencije oscilatora dolazi do punog izražaja, posebno pri temperaturnim promjenama. Zbog toga se uvode različita tehnička rješenja, kao npr. grijanje oscilatora uz termostatsku regulaciju [17] ili programirana korekcija frekvencije [25]. Geodetski institut TU München izvršio je brojna ispitivanja kolebanja frekvencije pri mjerenjima elektrooptičkim daljinomjerom visoke točnosti KERN MEKOMETAR ME3000 [14], [22], [23], a koja su pokazala neizbježnost kontrole mjerne frekvencije pri mjerenjima visokom točnosti prije i poslije mjerenja. Za najtočnija mjerenja kontrola je potrebna i u toku mjerenja što naravno poskupljuje mjerenje. Istaknimo da su za precizna mjerenja potrebne vrlo visoke modulacijske frekvencije (od 100 MHz do 5000 MHz), što znači i vrlo kratke mjerne jedinice. Tako npr. MEKOMETAR ME3000 ima mjernu frekvenciju  $f = 5000$  MHz, a mjerna jedinica iznosi 30 cm. MEKOMETAR ME3000 proizvodila je tvornica KERN od 1972. godine sve do izvedbe nove konstrukcije ME5000 [6], [13], [15]. Novina u konstrukciji daljinomjera ME3000 bila je primjena polarizacijske modulacije umjesto direktne amplitudne modulacije. Pri polarizacijskoj modulaciji putuje signal eliptički polarizirane svjetlosti s rotirajućim vektorom u taktu mjerne frekvencije. Kad se ovaj moduliarni val vrati nakon dvostrukog prolaza duljine dolazi na demodulator — KDP kristal kao analizator. Tek pri izlasku iz analizatora svjetlost je amplitudno modulirana, što ima za posljedicu adekvatne promjene intenziteta svjetlosti u taktu frekvencije. Mjerenje fazne razlike u usporedbi intenziteta odaslanog i povratnog signala pretvorenih u električne veličine je analogno, a primjena je kompenzacijska nul-metoda na osnovi mehaničkog pomaka čitavog sistema prizama. Uz izmjene frekvencije (ukupno 5 frekvencija), zbog rješavanja problema određivanja broja  $N$  mjerenje je trajalo 2 do 3 minute. Primjenom standardnog rezonatora kojem je frekvencija rezonancije ovisna o indeksu loma zraka pri svakoj promjeni stanja atmosfere, a to znači i promjeni indeksa loma, mijenja se automatski mjerna frekvencija, tako da je mjerna jedinica automatski korigirana. Srednja pogreška mjerene duljine do 3 km u optimalnim uvjetima iznosila je  $\pm (0,2 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ . U daljem razvoju elektrooptičkih daljinomjera visoke točnosti primijenjena su nova konstruktivna poboljšanja. Tako 1982. godine firma Com-Rad Electronic Equipment Limited — Engleska izrađuje daljinomjer GEOMENSOR CR204 [21]. U istom razdoblju tvornica KERN je proizvela novi model MEKOMETAR ME5000. Novi instrumenti se prema svom prethodniku razlikuju po većem dosegu (GEOMENSOR do 10 km, ME5000 do 8 km), većoj točnosti, većoj stabilnosti i jednostavnijim rukovanjem. Primijenjena je već afirmirana polarizacijska modulacija, a napušten je klasični način mjerenja fazne razlike uvođenjem

frekventnog načina mjerenja, što će povećati točnost mjerenja. Pri frekventnom načinu se fazna razlika ne mjeri, već se ostatak duljine anulira promjenom frekvencije. Izmjerena mjerna frekvencija pri faznoj razlici nula, tj. kada je duljina cjelobrojni višekratnik mjerne jedinice, mjerna je veličina za duljinu. Duljina se u osnovi može odrediti mjerenjem dviju uzastopnih frekvencija kad se u duljini koju mjerimo promjeni broj cijelih valnih duljina za jedinicu. Prema formuli za duljinu u faznih daljinomjera, ako je  $\Delta N\lambda/2 = 0$  bit će:

$$2D = N \cdot \frac{c_0}{n_0 f_0}, \text{ za mjerenje na frekvenciji } f_0$$

$$2D = (N - 1) \cdot \frac{c_0}{n_1 f_1}, \text{ za mjerenje na frekvenciji } f_1$$

$$2D = \frac{c_0}{n_0 f_0 - n_1 f_1},$$

gdje je:  $c_0$  brzina svjetlosti u vakumu,

$n_0, n_1$ , indeksi loma zraka pri mjerenju uz mjernu frekvenciju  $f_0$ , odnosno  $f_1$ .

Zbog potrebne visoke točnosti mjerenja, relacija mjernog procesa je složena, a mjeri se u rasponu frekvencije 455 MHz i 495 MHz (GEOMENSOR), odnosno 475 MHz i 495 MHz (ME5000). Čitavo ovo područje prelazi se u 5 frekvencija iterativnim putem uz sve veću razliku frekvencija. Detaljnije o mjernom procesu vidi [2], [13], [21]. Obradu rezultata i račun duljine vodi mikroročunalo. Proizvođači navode slijedeće srednje pogreške mjerenja duljine:

$$\text{CR204} \pm (0,1 \text{ mm} + 0,1 \text{ ppm}),$$

$$\text{ME5000} \pm (0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm}).$$

Ispitivanja jednog od prvih instrumenata CR204 mjerenjem 35 duljina u području 0,5 do 3 km pokazala su najveća apsolutna odstupanja  $\pm 1$  ppm, pa se sa sigurnošću mogu očekivati točnosti mjerenja na terenu:  $\pm (0,1 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm})$  [21].

Od instrumentalnih uzroka sistematskih pogrešaka osim problema stabilnosti frekvencije spomenimo i temperaturne ovisnosti funkcije elektroničkih elemenata. Ovi se problemi rješavaju nizom konstruktivnih zahvata (npr. unutrašnji kalibracijski put signala), no pri mjerenjima visokom točnosti nemoguće ih je u potpunosti eliminirati.

Vrlo značajni konstruktivni zahvati vršeni su u svrhu smanjivanja složenog utjecaja stanja atmosfere. Posljednjih godina došlo je do značajnog razvoja tzv. *disperzijskih instrumenata* koji pri mjerenjima koriste disper-

zijski efekt u svrhu smanjenja nepovoljnog utjecaja atmosfere. Ti instrumenti mjere na dvije ili više valnih duljina elektromagnetskih valova. Kako indeks loma zraka ovisi o valnoj duljini elektromagnetskog vala to dolazi do pojave disperzije, pa će se optički putovi monokromatskih valova razlikovati. Disperzijskim efektom moguće je odrediti npr. koeficijent refrakcije u svrhu korekcije pri mjerenjima durbinima teodolita ili nivelira, pa se u budućnosti predviđaju konstrukcije instrumenata kojima bi se mjerilo uz znatnu eliminaciju utjecaja refrakcije. Pri mjerenju duljina moguće je disperzijskim efektom dobiti točniju informaciju o geometrijskoj duljini promatranjem različitosti optičkih putova kojima su integralno obuhvaćene sve promjene indeksa loma.

#### 4. DVOVALNI I VIŠEVALNI FAZNI DALJINOMJERI

Prvi dvovalni daljinomjer pojavio se 1972. godine (ERNSHAW, HERNANDEZ).

Za realizaciju dvovalnog daljinomjera potrebni su vrlo snažni kontinuirani izvori, pa je primijenjen laser.

Uzmimo da elektromagnetski valovi s valnim duljinama  $\lambda_x$  i  $\lambda_y$  prelaze optičke putove  $D_x$  i  $D_y$ . Ovi su putovi po zakonima optike ekvivalentni zamišljenom pravocrtnom optičkom putu vala  $D$  (mjerena duljina koju val realno nikad ne prelazi) uz integralni srednji indeks loma  $n_x$  (za valnu duljinu  $\lambda_x$ ) odnosno  $n_y$  (za valnu duljinu  $\lambda_y$ ) u pretpostavljenom homogenom sredstvu. Slijedi:

$$D_x = n_x \cdot D; \quad D_y = n_y \cdot D.$$

Ne ulazeći ovdje u izvođenje (v. [2]), dobit ćemo konačni izraz za traženu duljinu  $D$  u obliku:

$$D = D_x - A \cdot (D_x - D_y),$$

gdje je  $A$  disperziona veličina praktički neovisna o temperaturi i tlaku zraka.

Vidimo da će točnost mjerenja duljine ovisiti o disperzivnoj veličini, te o točnosti mjerenja razlike optičkih putova ( $D_x - D_y$ ). Uzmemo li, da je točnost mjerenja razlike putova 0,1 mm, to će relativna pogreška duljine, uz pretpostavku bespogrešne veličine  $A$  biti:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{0,1A}{D} \text{ ppm}; \quad D \text{ u km.}$$

Pogreška će biti to manja, što je veličina  $A$  manja, a to će biti u slučaju kad je razlika primijenjenih valnih duljina veća. No u tome i jest osnovni problem konstrukcije ovih daljinomjera, budući da je u tu svrhu teško naći pogodne laserske izvore. Uz valne duljine npr. 365 nm i 650 nm veličina  $A$  iznosi približno 10, što daje pogrešku duljine 1 mm/km.



Prvi prenosivi dvovalni laserski elektrooptički daljinomjer GEORAN I (Nacionalni fizikalni laboratorij, Engleska, 1976.) mjerio je s valnim duljinama 458 nm i 514 nm. Uz  $A = 57$ . Visoke točnosti postignute su tek na duljinama preko 10 km (doseg 20 km). TERRAMETAR je prvi dvovalni daljinomjer serijske proizvodnje. Proizveden je 1977. (TERRA TECHNOLOGY CORPORATION, SAD) sa laserskim izvorima zračenja: helij-kadmijum valne duljine 441,6 nm i helij-neon valne duljine 632,8 nm. Čitav mjerni postupak je automatiziran, a baziran je na frekventnom načinu mjerenja. Mjerenja se obavljaju naizmjenice frekvencijom 10 Hz u »crvenom« i »plavom« kanalu, pa se praktički na obje valne duljine mjeri istodobno. Na osnovi izmjerenih frekvencija za obje valne duljine računalo računa razlike duljina i duljinu. Primjenjena je polarizacijska modulacija s frekvencijom 3 GHz, te mjerna jedinica iznosi svega 5 cm, a to je do sada najmanja primjenjena mjerna jedinica. Prije mjerenja unose se podaci o približnoj duljini, kao i meteorološki elementi za korekciju, a mikroracunalo računa sve korekcije. Korigirana se duljina pokazuje digitalno na pokazivaču nakon 10s. Instrument ima masu 40 kg, a napaja se energijom iz agregata. 1983. godine proizveden je novi model TERRAMETAR LDM2 građen na istom principu za mjerenja duljina 1 do 20 km s relativnom pogreškom prema podacima proizvođača  $1 \cdot 10^{-7}$ .

U razvoju su i daljinomjeri s tri osnovne valne duljine od kojih dvije pripadaju optičkom spektru, a treća valna duljina je u mikrovalnom području, kako bi se što točnije obuhvatio utjecaj tlaka vodene pare atmosfere na indeks loma i time u daljoj mjeri povećala točnost mjerenja. U prvim konstrukcijama primijenjeni su HeCd laser 441,6 nm, HeNe laser 632,8 nm i mikrovalni daljinomjer s valnom duljinom 3 cm. Prototipom ovog instrumenta postignute su relativne pogreške  $10^{-7}$ , ali je čitava oprema bila glomazna. Nakon razvoja TERRAMETRA može se očekivati i praktični trovalni daljinomjer.

Tehnički problemi izvedbe razlogom su što dvovalnim i viševalnim daljinomjerima još nisu postignute očekivane točnosti mjerenja i pogodne mase instrumenta [16]. Radi se i o vrlo skupim [16] instrumentima, pa njihova racionalna primjena dolazi u obzir tek pri mjerenju većih duljina.

Na kraju navedimo i problem adicione konstante daljinomjera što će posebno doći do izražaja pri mjerenjima visokom točnosti kraćih duljina.

## 5. ADICIONA KONSTANTA. PERIODIJSKE I APERIODIJSKE POGREŠKE PRI MJERENJU DULJINA

Adiciona konstanta je određena razlikom točne udaljenosti između vertikalnih osi daljinomjera i reflektora i izmjerene duljine daljinomjerom, ukoliko je u daljinomjeru namještena točna frekvencija odnosno multiplikaciona konstanta. Instrumentalna adicione konstanta nije uvjetovana samo dimenzijama i položajem mehaničkih i optičkih elemenata, već i funkcijom i međudjelovanjem elektroničkih sklopova i vodova. Zbog temperaturne ovisnosti, posebno elektroničkih sklopova, adicione konstanta je vremenski i promjenjiva. Ovi su utjecaji znatno smanjeni konstruktivnim zahvatima. Adicione konstanta reflektora uzrokovana je optičkim putem zraka kroz prizmu (ili prizme) ovisnom o geometrijskom putu zrake i indeksu loma

prizme. Ukupna poznata adicione konstanta uzima se u obzir već pri izvedbi daljinomjera, no za precizna mjerenja nužno je ispitivati njene promjene.

Promjenjivost adicione konstante ovisno o duljini uzrokuju periodijske i aperiodijske pogreške. Ovi su utjecaji vrlo složeni, a dolaze jednim dijelom do izražaja već pri točnostima mjerenja duljine ispod 5 mm. Periodijske ili cikličke pogreške uzrokovane su induktivnim međuutjecajem odašiljača i prijemnika, budući da se oni nalaze u istom kućištu instrumenta, kao i miješanjem odaslanog i primljenog signala zbog štetnih refleksa na prizma-ma i lećama, te drugih uzroka [28].

Periodijske pogreške mogu biti kratkovalne i dugovalne [20]. Kratkovalne periodijske pogreške najizraženije su u valnim duljinama jednakim mjernoj jedinici. Kratkovalne periodijske pogreške viših redova su one koje imaju kraće valne duljine od mjerne jedinice, a uzrokom im može biti višestruki put signala zbog refleksije na lećama ili diodama, ali i elektronička građa daljinomjera. Dugovalne periodijske pogreške imaju valne duljine veće od valne duljine mjernog signala. Utvrđene su periodijske pogreške koje odgovaraju valnoj duljini niže mjerne frekvencije (tzv. grubo mjerenje). Istraživanja pokazuju da se mogu pojaviti i dugovalne periodijske pogreške višeg reda. Amplitude svih ovih periodijskih pogrešaka manje su od 5 mm, no očito je da u preciznim mjerenjima dolaze do punog izražaja, pa predstavljaju, ako nisu detaljno ispitane, značajan ograničavajući faktor točnosti mjerenja.

Dok se periodijske pogreške mogu ispitati i odrediti mjerenjem na nosačima (šinjama) za ispitivanje periodijske pogreške na kalibracijskoj bazi, aperiodijske pogreške nije moguće tako jednostavno odrediti. Uzroci ovih pogrešaka su složeni. U stručnoj literaturi ove se pogreške često opisuju pod nazivom *nehomogenosti faze*, budući da je osnovni uzrok u nehomogenosti površinskog sloja dioda, a time i njihove različite osjetljivosti pri prolazu signala različitim mjestima dioda. Na taj način dolazi pri mjerenju do faznog pomaka u ovisnosti o geometrijsko-optičkom putu zraka, pa govorimo o nehomogenosti faze uzrokovane promjenom smjera viziranja. Rezultat mjerenja ovisan je o usmjerenju daljinomjera. Izvjestan utjecaj na aperiodijske pogreške ima i reflektor, budući da se pojavljuju inače neobjašnjive razlike u mjernim rezultatima primjenom različitih tipova reflektora i uz korekciju adicione konstante.

Iz prikazanog vidimo, da se današnje mogućnosti mjerenja elektrooptičkim daljinomjerima visokih točnosti kreću u veličini relativne pogreške i do  $10^{-7}$ . Očito je da se takve točnosti mogu postići samo uz vrlo skupi instrumentarij, ali i uz nužnost kalibriranja instrumenta te uz izuzetno visoku stručnost mjeritelja. Ispitivanje i kalibriranja svih elektroničkih daljinomjera moraju se provoditi stalno u određenim vremenskim razmacima, a daljinomjera visokih točnosti naročito prije i poslije mjerenja u specijaliziranim laboratorijima i na kalibracijskim bazama kakve su na primjer realizirane na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (u blizini Zagreba), Paraćinu i Logatcu [18], [26], [27].

## LITERATURA

- [1] Benčić, D.: O osnovnoj mjernoj jedinici u geodeziji, Geodetski list, 1984, 1—3, 5—11.
- [2] Benčić, D.: Geodetski instrumenti, Školska knjiga, Zagreb, u tisku.
- [3] Bilajbegović, A.: Točnost trilateracije s aspekta točnosti korekcija elektrooptički mjerenih duljina, Geodetski list, 1988, 7—9, 195—206.
- [4] Bolšakov, Deumlich, Golubov, Vasilev: Elektronische Streckenmessung, Verlag für Bauwesen Berlin, Berlin, 1985.
- [5] Deumlich, F.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1980.
- [6] Firma Kern: Das Mass ME5000, Aarau 1988, 1—25.
- [7] Grimm, K., Frank, P., Giger, K.: Timed-pulse distance measurement with geodetic accuracy, Wild Heerbrugg, May 1986, 1—14.
- [8] Hipp, I.: Eine neue Entfernungsmessungsfamilie mit Puls-Laufzeit-Messverfahren (FEN 2000), AVN, 1983, 11—12, 461—464.
- [9] Hipp, I.: Reflektorlose Entfernungsmessung mit Pulslaufzeit — Messverfahren (FEN 101), AVN, 1986, 5, 209—211.
- [10] Kahmen, H.: Elektronische Messverfahren in der Geodäsie, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe 1977.
- [11] Kontić, S.: Jedan novi način mjerenja dužina, Geodetska služba 9/1974.
- [12] Kontić, S.: Elektronsko mjerenje dužina, Beograd 1972.
- [13] Mauer, W., Schirmer, W., Schwarz, M.: Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten des Mekometer ME5000, X Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München 1988, A 10/1—4.
- [14] Meier-Hirmer: Mekometer ME3000 — Teoretical Aspects, Frequency Calibration, Field Tests, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe 1977.
- [15] Meier, D., Loser, R.: Das Mekometer ME5000 — Ein neuer Präzisionsdistanzmesser, AVN, 1986, 5, 182—190.
- [16] Meier, D., Loser, R.: Versuche mit einem Zwei-Farben-Distanzmesser, X Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, 1988, A 11/1—12.
- [17] Mrkić, R., Kontić, S.: Elektronsko mjerenje dužina, Naučna knjiga, Beograd 1987.
- [18] Mrkić, R., Kontić, S., Kokalović, M.: Primarni etaloni uglova i dužina SFRJ i njihov značaj za osnovne geodetske radove. Zbornik radova sa Savjetovanja o osnovnim geodetskim radovima i opremi za njihovo izvođenje, Struga 1987, 349—368.
- [19] Mrkić, R.: Prilog objektivnoj ocjeni točnosti mjerenja dužina elektronskim daljinomjerima, (disertacija), Beograd 1978.
- [20] Rüeger, J., Covell, P.: Zur Konstanz und Vielfältigkeit zyklischer Fehler in elektrooptischen Distanzmessern, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1980, 6, 261—266.
- [21] Scherer, M.: Der Präzisionsdistanzmesser CR204 GEOMENSOR — Funktionsprinzip und erste Feld-Probungen —, Zeitschrift für Vermessungswesen, 1985, 4, 135—145.
- [22] Schnädelbach, K., Mauer, W.: Ein neues Frequenzmessverfahren für das Mekometer ME3000, AVN, 1978, 10, 350—355.
- [23] Schnädelbach, K.: Zur Reduktion von Entfernungsmessungen mit dem Mekometer ME3000, AVN, 1981, 4, 145—149.
- [24] Solarić, N.: Današnji geodetski instrumenti i njihova elektronička osnova, Zbornik radova komisije za automatizaciju, Savez geodetskih inženjera i geometara Hrvatske, svezak 1/1974, Zagreb, 51—80.
- [25] Solarić, N., Benčić, D.: Razvoj novih elektrooptičkih daljinomjera s posebnim osvrtom na impulsne daljinomjere, Geodetski list 1987, 10—12, 319—328.
- [26] Vodopivec, F.: Dolžinska komparatorska baza SRS v Logatcu, Institut GZ SRS, Geodetski zavod SRS, Ljubljana 1977, 1—49.
- [27] Vodopivec, F., Kogoj, D.: Ponovna izmera komparatske baze Logatec, Geodetski vesnik 1985, 1, 43—53.
- [28] Zeiske, K.: Prüfverfahren für elektronische Tachymeter — gezeigt am Beispiel des Wild TC1, Wild Heerbrugg 1980, 1—8.
- [29] Zetsche, H.: Elektronische Entfernungsmessung (EDM), Vermessungswesen bei Konrad Wittver, Stuttgart 1979.

## SAŽETAK

U ovom radu pregledno su opisani problemi elektrooptičkog mjerenja duljina visokom točnosti. Opisana su konstruktivna rješenja u svrhu postizanja visokih točnosti mjerenja, a posebno je ukazano na nužnost ispitivanja i stalne kontrole elektroničkih daljinomjera na kalibracijskoj bazi, kakove su na primjer realizirane na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (u blizini Zagreba), Paraćinu i Logatcu.

## ZUSAMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden die Probleme der elektronischen Entfernungsmessung hoher Genauigkeit übersichtlich beschrieben. Es wurden die konstruktive Lösungen für diesen Ziel dargestellt als auch die Wichtigkeit der ständigen Prüfungen und Kontrolle der elektronischen Entfernungsmesser auf der Kontrollbasis wie es auch zum Beispiel auf der Geodätischen Fakultät der Universität Zagreb (in der Nähe von Zagreb), Paraćin und Logatec realisiert wurden.

Primljeno: 1989-01-28