

UDK 528.021.7:528.061:528.517.8:528.27:004.4
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Automatizacija ispitivanja preciznosti elektrooptičkih daljinomjera na kalibracijskoj bazi

Đuro BARKOVIĆ, Mladen ZRINJSKI, Sergej BARIČEVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U radu je dan prikaz korekcija i redukcija duljina mjerenih elektrooptičkim daljinomjerima do konačne vrijednosti u ravnini kartografske projekcije Republike Hrvatske – HTRS96/TM. Kako bi se moglo pouzdati u mjerenja obavljena elektrooptičkim daljinomjerima potrebno ih je ispitati periodično ili prema potrebi prije radova koji zahtijevaju veću točnost i pouzdanost mjerenja. Za terensko ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera donesena je norma ISO 17123-4:2012, koja opisuje jednostavni i potpuni terenski postupak ispitivanja preciznosti, odnosno procjenu mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja. Detaljno je prikazan potpuni postupak ispitivanja preciznosti mjerenja duljina geodetskim mjernim stanicama Leica TC2003, Leica TCA2003 i Leica TCRP1201 na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Za potrebe terenskog ispitivanja izrađen je računalni program ISO_DISTANCE prema normi ISO 17123-4:2012, kako bi postupak bio automatiziran.

Ključne riječi: elektrooptički daljinomjer, korekcija, redukcija, preciznost, kalibracijska baza.

1. Uvod

Za sve geodetske radove projektom je zadana određena mjerna nesigurnost koja određuje koji će se instrumentarij koristiti. Svaki instrument ima određene karakteristike, a unutar njih i deklariranu preciznost mjerenja duljina. Potrebno je naglasiti da su sve karakteristike definirane od proizvođača geodetskih instrumenata u strogo reguliranim i poznatim laboratorijskim uvjetima. Kako na terenu postoje uvjeti koji dodatno utječu na točnost mjerenja (atmosferske prilike), kao i to da starenjem instrumenata opada točnost mjerenja, potrebno je periodično ili prije samog mjerenja ispitati deklariranu preciznost instrumenta.

¹ Prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: djuro.barkovic@geof.hr,

doc. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mladen.zrinjski@geof.hr,

Sergej Baričević, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: sbaricevi@geof.hr.

Ne tako davno, prilikom obavljanja preciznih geodetskih radova nastojalo se izbjeći mjerenje duljina jer je postojeći instrumentarij omogućavao višu razinu preciznosti mjerenja horizontalnih i vertikalnih kutova u odnosu na mjerenje duljina. Stoga se najčešće primjenjivala triangulacijska metoda, kojom se duljina određena visokom točnošću trigonometrijski prenosila dalje u mreži trokuta. Razvojem elektrooptičkih daljinomjera sve se češće počela primjenjivati triangotrilateracijska, kao i trilateracijska metoda. Daljnjim napretkom tehnologije i razvojem elektrooptičkih daljinomjera, kao sastavnih dijelova geodetskih mjernih stanica, omogućeno je precizno mjerenje duljina zahtijevane (potrebne) mjerne nesigurnosti čime je izrazito povećana efikasnost pri obavljanju određenih geodetskih radova.

Jedan od načina ispitivanja preciznosti mjerenja duljina elektrooptičkim daljinomjerom opisan je normom ISO 17123-4:2012. U Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu razvijaju se različiti postupci automatizacije ispitivanja preciznosti geodetskih mjerila (Zrinjski i dr. 2010, Zrinjski i dr. 2011, Zrinjski i dr. 2013, Barković i dr. 2014, Zrinjski i dr. 2015).

Za automatizaciju postupka ispitivanja preciznosti mjerenja duljina izrađen je računalni program ISO_DISTANCE prema normi ISO 17123-4:2012. Kako bi se dobila ocjena preciznosti mjerenja duljina prema navedenoj normi, potrebno je mjerene duljine korigirati za vanjske utjecaje i reducirati na horizont. U daljnjem tekstu prikazane se sve korekcije i redukcije mjerenih duljina.

2. Korekcije i redukcije mjerenih duljina

Mjerenje kosih duljina na terenu obavlja se pri atmosferskim uvjetima različitim od laboratorijskih, a to se prije svega odnosi na temperaturu i tlak zraka, vlažnost zraka, vjetrovitost i osunčanost te na određenu nadmorsku visinu, dok se svi izračuni provode na lokalnoj horizontalnoj ravnini ili u ravnini službene državne ili dogovorene kartografske projekcije. Kako bi se dobila referentna vrijednost mjerne duljine u ravnini projekcije potrebno je izračunati korekcije i redukcije mjerene duljine (Benčić i Solarić 2008):

- korekciju zbog odstupanja mjerne frekvencije i adicijsku korekciju,
- korekcije zbog prolaza signala kroz atmosferu (meteorološke i atmosferske korekcije),
- redukciju kose duljine na horizont,
- redukciju duljine na referentni elipsoid,
- redukciju u ravninu projekcije,
- redukciju duljine u horizontalnom smjeru na pravac koji prolazi prvom i zadnjom točkom bazne linije (pri mjerenju na kalibracijskoj bazi).

2.1. Adicijska korekcija duljine i korekcija zbog odstupanja mjerne frekvencije

Adicijska korekcija ili korekcija (pomak) nul-točke instrumenta određena je razlikom udaljenosti D između vertikalnih osi instrumenta i reflektora i udaljenosti L između referentnih točaka stvarno izmjerenih točaka, odnosno uzrokovana je gradom instrumenta i reflektora (Benčić i Solarić 2008). Adicijska korekcija (korekcija nul-točke), $a = D - L$, može se odrediti posebnim mjernim i računskim

postupkom na kalibracijskoj bazi što je i jedan od ciljeva ispitivanja koje je opisano u ovom radu.

Pogreška mjerne jedinice daljinomjera rezultat je odstupanja osnovne mjerne frekvencije od nominalne vrijednosti. Korekcija duljine zbog odstupanja mjerne frekvencije prikazuje se izrazom (Benčić i Solarić 2008):

$$\Delta D = -D \frac{\Delta f}{f}, \quad (1)$$

gdje su:

ΔD – korekcija duljine zbog odstupanja mjerne frekvencije,

D – mjerena kosa duljina,

Δf – razlika između mjerene frekvencije i nominalne frekvencije kojom je određena mjerna jedinica,

f – mjerna frekvencija.

Iz navedene formule (1) razvidno je da pogreška koja nastaje zbog odstupanja mjerne frekvencije proporcionalno raste s mjerenom duljinom pa stoga proizvođači u karakteristikama instrumenta tu vrijednost mjerne nesigurnosti daljinomjera navode u jedinici „ppm“ („parts per million“).

Vrijednost duljine korigirane za adicijsku korekciju i korekciju zbog odstupanja mjerne frekvencije računa se prema izrazu (Benčić i Solarić 2008):

$$D_{af} = D + \Delta D + a, \quad (2)$$

gdje su:

D_{af} – duljina korigirana za adicijsku korekciju i korekciju zbog odstupanja mjerne frekvencije,

a – adicijska korekcija.

2.2. Meteorološke i atmosferske korekcije

2.2.1. Prva brzinska korekcija duljine

Fizikalni princip elektrooptičkog mjerenja duljine zasniva se na mjerenju vremena koje je potrebno elektromagnetskom valu za prijelaz dvostruko mjerene duljine, odnosno duljine od instrumenta do reflektora i natrag. Uz pretpostavku da se elektromagnetski val kroz atmosferu širi pravocrtno konstantnom brzinom c , može se napisati osnovni izraz za određivanje duljine (Benčić i Solarić 2008):

$$D = \frac{1}{2} ct = Kt, \quad (3)$$

gdje su:

D – mjerena kosa duljina,

t – vrijeme potrebno mjernom signalu za prijelaz dvostrukog puta (naprijed i natrag),

$K = \frac{1}{2}c$ – multiplikacijska konstanta.

Svaki elektrooptički daljinomjer umjeren je u tvornici na određenu radnu brzinu za indeks loma referentne atmosfere n_0 , a svako odstupanje stanja atmosfere od te referentne uzrokovat će pogrešku u mjerenju duljine. Određivanjem srednjeg indeksa loma n atmosfere u kojoj mjerimo, uvodi se tzv. brzinska korekcija duljine (Benčić i Solarić 2008).

Uz poznatu brzinu elektromagnetskog vala u vakuumu c_0 odredit će se brzina u zraku kao optičkom sredstvu poznavanjem njegova indeksa loma n temeljem poznatog zakona iz optike:

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

odnosno,

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad (4)$$

gdje je:

c – brzina vala tijekom mjernog procesa, a naziva se i *radnom (grupnom) brzinom*.

Uvrštavanjem izraza (4) u izraz (3), deriviranjem istog, te uz činjenicu da je indeks loma zraka $n \approx 1$, izraz za prvu brzinsku korekciju duljine K_1 glasi:

$$K_1 = (n_0 - n) \cdot D. \quad (5)$$

Konačan izraz za prvu brzinsku korekciju je (Benčić i Solarić 2008):

$$K_1 = (N_0 - N) \cdot 10^{-6} \cdot D, \quad (6)$$

gdje su:

$N = (n - 1) \cdot 10^6$ – apsolutni indeks loma (indeks loma sredstva prema vakuumu),

N_0 – instrumentalna konstanta.

Duljina korigirana za prvu brzinsku korekciju, D_1 , izračunat će se prema izrazu:

$$D_1 = D + K_1. \quad (7)$$

Navedena formula općenitog je sadržaja, dok se u praksi za svaki daljinomjer ova korekcija računa prema formuli iz uputa proizvođača, odnosno unosom

parametara u instrument isti može automatski računati iznos duljine korigirane za prvu brzinsku korekciju. Pa tako za mjerne stanice Leica TC2003 i Leica TCA2003 izraz glasi (Leica 2000):

$$\Delta D_1 = \left\{ 283,04 - \left[\frac{0,29195 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \cdot 10^z \right] \right\} \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

dok za instrument Leica TCRP1201 glasi (Afeni 2011):

$$\Delta D_1 = \left\{ 283,05 - \left[\frac{0,29196 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \cdot 10^z \right] \right\} \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

gdje su u oba navedena izraza:

ΔD_1 – prva brzinska korekcija duljine [ppm],

p – tlak zraka [hPa],

t – temperatura zraka [°C],

h – relativna vlažnost zraka [%],

$\alpha = 1/273,16$,

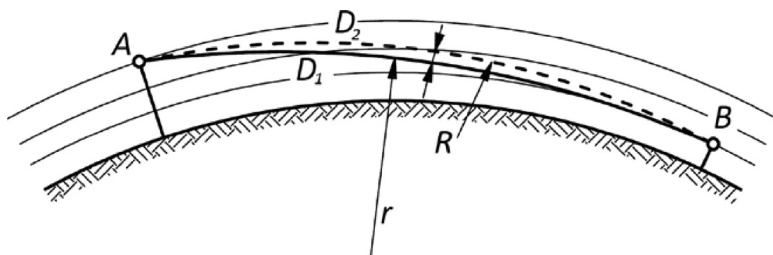
$\chi = \frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t} + 0,7857$.

Tada se duljina korigirana za prvu brzinsku korekciju računa prema izrazu:

$$D_1 = D + \Delta D_1 \cdot D. \quad (10)$$

2.2.2. Druga brzinska korekcija duljine

Prilikom mjerenja većih duljina potrebno je uzeti u obzir činjenicu da se elektromagnetski val ne rasprostire po kružnom luku polumjera Zemlje R , već po refrakcijskoj krivulji polumjera r , koji je oko 8 puta veći od polumjera Zemlje (Benčić i Solarić 2008, slika 1).



Slika 1. Putanja elektromagnetskog vala (Benčić i Solarić 2008).

To znači da mjerni signal prolazi kroz slojeve gustoće pri stabilnoj homogenoj atmosferi za koju se pretpostavlja da se indeks loma mijenja linearno s visinom. Iz tih pretpostavki izraz za korekciju srednjeg indeksa loma glasi (Höpcke 1965, Höpcke 1966):

$$dn = (k - k^2) \frac{D_1^2}{12R^2}, \quad (11)$$

gdje je:

$$k = \frac{R}{r} - \text{koeficijent refrakcije.}$$

Konačni izraz za drugu brzinsku korekciju duljine glasi (Benčić i Solarić 2008):

$$K_2 = -\left(k - k^2\right) \frac{D_1^3}{12R^2}. \quad (12)$$

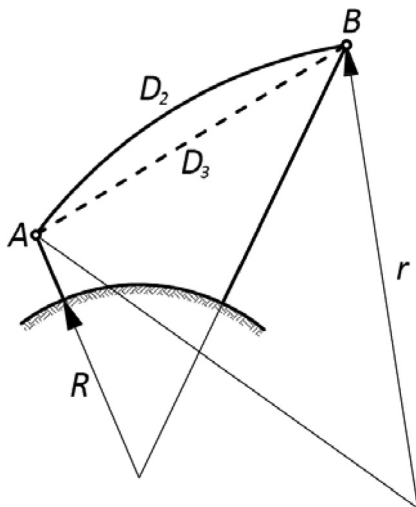
Duljina korigirana za drugu brzinsku korekciju računa se prema izrazu:

$$D_2 = D_1 + K_2. \quad (13)$$

Druga brzinska korekcija uvodi se samo pri mjerenju duljina većih od 40 km (Benčić i Solarić 2008).

2.2.3. Korekcija zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje

Zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje potrebno je njezin segment na putu od stajališta do točke reducirati na tetivu (Benčić i Solarić 2008, slika 2).



Slika 2. Korekcija zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje (Benčić i Solarić 2008).

Korekcija zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje računa se prema izrazu (Benčić i Solarić 2008):

$$K_3 = -k^2 \frac{D_2^3}{24R^2}, \quad (14)$$

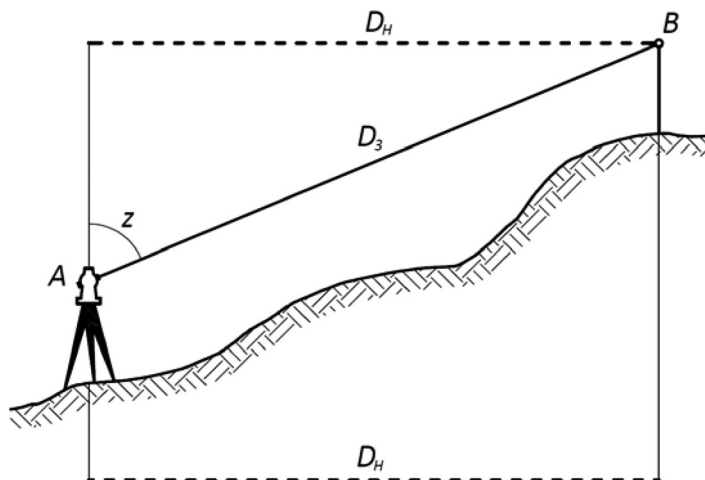
a korigirana duljina:

$$D_3 = D_2 + K_3. \quad (15)$$

Korekcija zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje uvodi se samo pri mjerenju iznimno velikih duljina, duljih od 40 km (Benčić i Solarić 2008).

2.3. Redukcija kose duljine na horizont

Nakon uvođenja prethodno navedenih korekcija dobije se stvarna kosa duljina između instrumenta i reflektora, koju je potrebno reducirati na horizont. Kako bi bilo moguće reducirati koso mjerenu duljinu na horizont, potrebno je izmjeriti i zenitni kut. Duljina reducirana na horizont uglavnom se upotrebljava za izračune na lokalnoj horizontalnoj ravnini.



Slika 3. Mjerenje kose duljine na terenu.

Iz slike 3 je razvidno:

$$D_H = D_3 \cdot \sin z, \quad (16)$$

gdje su:

D_H – horizontalna duljina,

D_3 – stvarna kosa duljina (mjerena kosa duljina korigirana za meteorološke utjecaje),

z – zenitni kut.

Prilikom mjerenja na terenu velika većina geodetskih mjernih stanica automatski računa i prikazuje horizontalnu duljinu iz mjerenih elemenata, dok se prva brzinska korekcija može izračunati također automatski ili naknadno u obradi.

Budući da za duljine kraće od 40 km vrijedi $K_2 = 0$ i $K_3 = 0$, slijedi $D_1 = D_2 = D_3$.

Ako se koso mjerena duljina D reducira na horizont dobije se $D_{H\text{-nekorigirano}}$, koja se korigira za prvu brzinsku korekciju K_{1-H} , pa analogno izrazima (16), (7) i (10) slijedi:

$$D_{H\text{-nekorigirano}} = D \cdot \sin z,$$

$$D_H = D_{H\text{-nekorigirano}} + K_{1-H},$$

$$K_{1-H} = \Delta D_1 \cdot D_{H\text{-nekorigirano}}.$$

Budući da je ΔD_1 nepromjenjivi koeficijent u odnosu na mjerenu duljinu i zenitni kut, odnosno ovisan je samo o atmosferskim parametrima, slijedi:

$$D_H = D \cdot \sin z + \Delta D_1 \cdot D \cdot \sin z,$$

$$D_H = D \cdot \sin z \cdot (1 + \Delta D_1). \quad (17)$$

Ako se koso mjerena duljina najprije korigira pa onda reducira na horizont, odnosno uvrsti se izraz (10) u (16), slijedi:

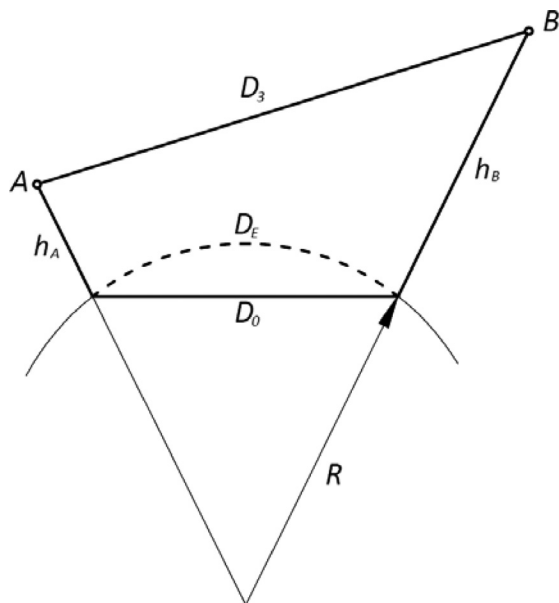
$$D_H = (D + \Delta D_1 \cdot D) \cdot \sin z,$$

$$D_H = D \cdot \sin z \cdot (1 + \Delta D_1). \quad (18)$$

Iz jednakosti izvedenih izraza (17) i (18) razvidno je da u slučaju duljina kraćih od 40 km nije bitan redoslijed računanja prve brzinske korekcije i redukcije na horizont.

2.4. Redukcija na plohu referentnog elipsoida

Redukcijom duljine na referentni elipsoid dobiva se duljina geodetske linije koja se praktično može smatrati jednakom duljini normalnog presjeka (Benčić i Solarić 2008, slika 4).



Slika 4. Redukcija kose duljine na referentni elipsoid (Benčić i Solarić 2008).

Duljinu luka na elipsoidu D_E najjednostavnije je računati uz prethodno računanje tetive D_0 prema izrazu (Benčić i Solarić 2008):

$$D_0 = \frac{\sqrt{D_3^2 - (h_B - h_A)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{h_A}{R}\right)\left(1 + \frac{h_B}{R}\right)}}, \quad (19)$$

gdje su:

D_3 – stvarna kosa duljina (mjerena kosa duljina korigirana za meteorološke utjecaje),

h_A – elipsoidna visina stajališne točke,

h_B – elipsoidna visina vizurne točke,

R – polumjer zakrivljenosti elipsoida u središnjoj točki mjerene duljine,
 $R = \sqrt{M \cdot N}$,

M – polumjer zakrivljenosti meridijanske elipse u središnjoj točki duljine,

N – polumjer zakrivljenosti u ravnini prvog vertikala u središnjoj točki duljine.

S tetive D_0 prelazi se na duljinu luka D_E izrazom (Benčić i Solarić 2008):

$$D_E = D_0 \left(1 + \frac{D_0^2}{24R^2}\right). \quad (20)$$

Koliki je polumjer zakrivljenosti elipsoida koji predstavlja Zemlju najbolje se očituje u podatku da razlika između D_0 i D_E na duljinu od 10 km iznosi 1 mm (Benčić i Solarić 2008).

2.5. Redukcija u ravninu projekcije

Od 1. siječnja 2010. službeni projekcijski koordinatni sustav Republike Hrvatske je Hrvatski terestrički referentni sustav 1996 u ravnini transverzalne Mercatorove projekcije (HTRS96/TM). To je poprečna Mercatorova cilindrična projekcija sa srednjim meridijanom preslikavanja $16^{\circ}30'$ istočne elipsoidne dužine i linearnim mjerilom na srednjemu meridijanu 0,9999 (Državna geodetska uprava 2009).

Kada bi se dužina D_E preslikavala u ravninu projekcije točku po točku, dobila bi se zakrivljena linija (Borčić 1976, Rezo 2013). Budući da se u ravnini želi računati s ravnim linijama, potrebno je reducirati duljinu luka D_E u ravnini kartografske projekcije na duljinu D_R pojednostavnjenim izrazom (Kogoj 2006, Rezo 2013, Barković i Zrinjski 2015):

$$D_R = D_E \left(\frac{E^2}{2R^2} - 0,0001 \right), \quad (21)$$

gdje su:

- E – udaljenost od srednjeg meridijana preslikavanja,
- R – radijus zakrivljenosti Zemlje.

Za preciznije radove redukcija u ravninu projekcije računa se prema opsežnim izrazima danima u: Tehničke specifikacije za postupke računanja i podjelu na listove službenih karata i detaljne listove katastarskog plana u kartografskoj projekciji Republike Hrvatske – HTRS96/TM (Državna geodetska uprava 2009) te se u ovom radu neće detaljno navoditi.

2.6. Redukcija duljine u horizontalnom smjeru na pravac koji prolazi prvom i zadnjom točkom bazne linije

Prilikom mjerenja na kalibracijskoj bazi prva i posljednja točka bazne linije (stupovi) odabrane za mjerenje definiraju pravac u horizontalnoj ravnini. Iako se teorijski na kalibracijskoj bazi sve točke nalaze u istom pravcu, u praksi dolazi do vrlo malih odstupanja te je zbog toga mjerene duljine potrebno reducirati na pravac između prve i posljednje točke bazne linije. Ako u horizontu stajališta koje je ujedno i prva točka bazne linije pravac mjerene duljine odstupa od pravca za kut $\Delta\alpha$, može se dati izraz za horizontalnu redukciju duljine na pravac koji prolazi prvom i zadnjom točkom bazne linije (Zrinjski 2010, slika 5):

$$p = D_H \cdot \sin \Delta\alpha, \quad (22)$$

gdje su:

- p – poprečno odstupanje točke,
- $\Delta\alpha$ – horizontalni kut između pravca koji prolazi kroz početnu i završnu točku bazne linije i pravca kroz stajalište i vizurnu točku.



Slika 5. Horizontalna redukcija duljine mjerene s početne točke bazne linije na pravac (Zrinjski 2010).

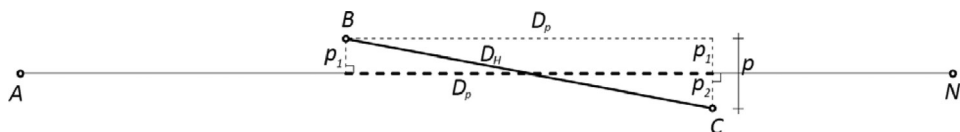
Tada se korigirana duljina D_p može dati izrazom (Zrinjski 2010):

$$D_p = \sqrt{D_H^2 - p^2}. \quad (23)$$

U slučaju kada se mjeri duljina između dviju točaka unutar bazne linije, postoji vjerojatnost da se obje točke nalaze izvan pravca (slika 6). Tada se korigirana duljina također računa prema izrazu (23), osim što se vrijednost poprečnog odstupanja daje izrazom:

$$p = |p_1 - p_2|, \quad (24)$$

uz uvjet da poprečno odstupanje s jedne strane pravca ima pozitivan, a s druge negativan predznak.



Slika 6. Horizontalna redukcija duljine na pravac.

3. Norma ISO 17123-4:2012

Norma je dokument donesen konsenzusom i odobren od priznatoga tijela, koji za opću i višekratnu uporabu daje pravila, upute ili značajke za djelatnosti ili njihove rezultate radi postizanja najboljeg stupnja uređenosti u danome kontekstu (URL 1). Prema Geodetsko-geoinformatičkom rječniku, norma je isprava namijenjena općoj i višekratnoj uporabi radi postizanja optimalne razine i uređenosti u danom kontekstu, koja određuje pravila, odrednice ili značajke za djelatnosti ili njihove rezultate. Stvorena je suglasjem priznatog tijela koje ju potvrđuje (Frančula i Lapaine 2008).

Najveća svjetska organizacija za donošenje normi je International Organization for Standardization (ISO) (URL 2), dok u Republici Hrvatskoj djeluje Hrvatski zavod za norme (HZN), ustanova koja se brine za donošenje nacionalnih ili prihvaćanje međunarodnih normi.

Budući da u ovom trenutku postoje norme uglavnom za sve djelatnosti, tako postoje i one za područje geodezije i geoinformatike. Međunarodna norma za

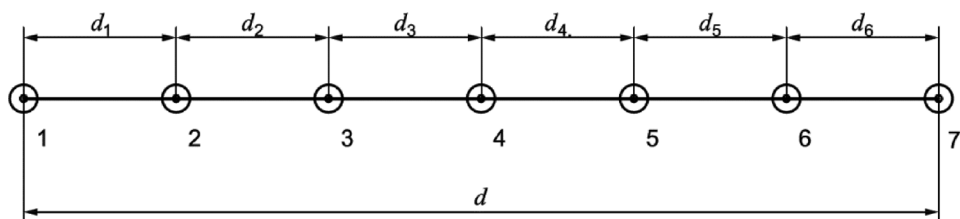
ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera prema kojoj se provodilo ispitivanje opisano u ovom radu je ISO 17123-4:2012, Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments) (ISO 2012), dok je ta ista norma prihvaćena kao hrvatska norma u Hrvatskom zavodu za norme pod nazivom HRN ISO 17123-4:2014, Optika i optički instrumenti – Terenski postupci za ispitivanje geodetskih instrumenata i instrumenata izmjere – 4. dio: Elektrooptički daljinomjeri (EDM instrumenti) (HRN ISO 2014).

3.1. Ispitivanje preciznosti elektrooptičkih daljinomjera prema normi ISO 17123-4:2012

U normi ISO 17123-4:2012 (ISO 2012) opisani su terenski postupci i načini obrade i prikazivanja rezultata mjerenja temeljem kojih se procjenjuje preciznost elektrooptičkog daljinomjera i pripadajuće pomoćne opreme. Za vrijeme ispitivanja na terenu potrebno je mjeriti i atmosferske uvjete zbog korekcija koje treba provesti u obradi dobivenih mjerenja. Ispitivanje na terenu obavlja se na dva načina: jednostavnim postupkom i potpunim postupkom ispitivanja. Za precizno ispitivanje daljinomjera potrebno je provesti potpuni postupak ispitivanja. Tim testom moguće je odrediti standardno odstupanje mjerenja duljine s kao i adicijsku korekciju δ . Ta norma također opisuje tri statistička testa kojima se testira nalazi li se dobiveno standardno odstupanje s unutar deklariranog odstupanja instrumenta σ , pripadaju li testirani uzorci istom većem skupu te je li adicijska korekcija δ jednaka nuli ili deklariranog vrijednosti δ_0 .

3.1.1. Konfiguracija bazne linije

Bazna linija za ispitivanje treba biti duljine od 300 do 600 metara (po potrebi može biti i dulja) te se sastojati od sedam točaka u pravcu (slika 7).



Slika 7. Bazna linija za potpuno ispitivanje (ISO 2012).

Bazna linija može se uspostaviti na dva načina:

- bazna linija s 21 različitom dužinom,
- bazna linija s kojom je uključeno i ispitivanje cikličke pogreške instrumenta.

Za određivanje adicijske korekcije upotrebljava se postupak mjerenja 21 različite duljine unutar bazne linije od sedam točaka, a najbolji će se rezultati dobiti ako točke budu na sljedećim međusobnim udaljenostima:

$$\begin{array}{lll}
 d_1 = \frac{d}{63}, & d_2 = 2d_1, & d_3 = 4d_1, \\
 d_4 = 8d_1, & d_5 = 16d_1, & d_6 = 32d_1,
 \end{array}$$

gdje je d ukupna duljina bazne linije.

3.1.2. Mjerenje dužina

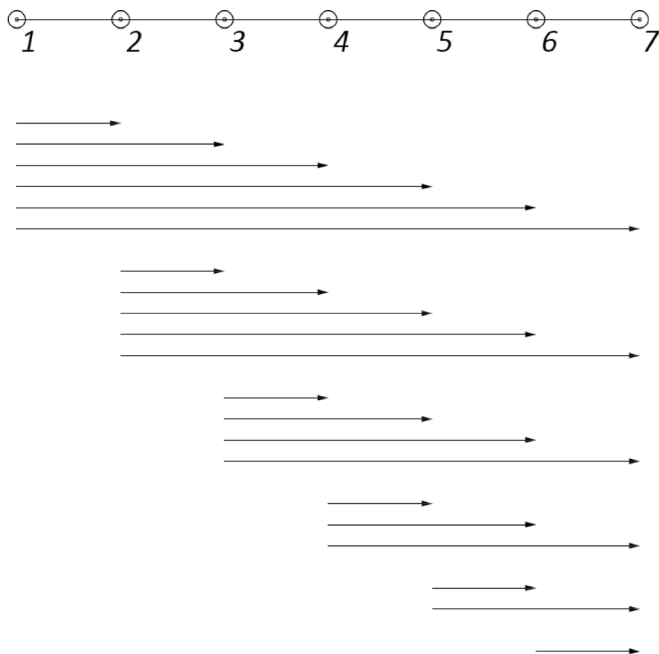
Kako je već navedeno, potrebno je mjeriti 21 duljinu na baznoj liniji (slika 8), te mjeriti atmosferske parametre u isto vrijeme.

Svaku pojedinu dužinu moguće je mjeriti u više ponavljanja iz kojih se konačna vrijednost mjerene duljine $\bar{L}_{p,q}$ dobije računanjem aritmetičke sredine:

$$\bar{L}_{p,q} = \frac{L_{p,q_1} + \dots + L_{p,q_n}}{n}, \quad (25)$$

gdje su:

- $L_{p,q}$ – pojedinačno mjerena dužina,
- p – broj točke stajališta,
- q – broj vizurne točke,
- n – broj ponavljanja pojedinačnih mjerenja dužine.



Slika 8. Prikaz 21 dužine koje je potrebno mjeriti (ISO 2012).

3.1.3. Izračun

Mjerenja $\bar{L}_{p,q}$ aritmetičke su sredine sirovih mjerenja elektrooptičkog daljinomjera koja je potrebno korigirati za atmosferski utjecaj, a ako su mjerene kose duljine i nisu automatski u instrumentu reducirane na horizont, potrebno je to učiniti naknadno. Takva popravljena mjerenja podvrgavaju se izjednačenju posrednih mjerenja po metodi najmanjih kvadrata rješavanjem normalnih jednadžbi $\mathbf{N}\mathbf{x} - \mathbf{n} = 0$, gdje se kao nepoznanice uvode udaljenosti između točaka $\bar{x}_{1,2}$, $\bar{x}_{2,3}$, $\bar{x}_{3,4}$, $\bar{x}_{4,5}$, $\bar{x}_{5,6}$, $\bar{x}_{6,7}$ i adicijska korekcija δ (Feil 1989, Rožić 2007, ISO 2012). Tada funkcijske jednadžbe posrednih mjerenja $\bar{\mathbf{L}}_{p,q} = \mathbf{L}_{p,q} + \mathbf{v}_{p,q} = \mathbf{f} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{A}\mathbf{x}$ glase:

$$\begin{aligned} L_{1,2} + v_{1,2} &= 1 \cdot x_{1,2} + 0 \cdot x_{2,3} + 0 \cdot x_{3,4} + 0 \cdot x_{4,5} + 0 \cdot x_{5,6} + 0 \cdot x_{6,7} - 1 \cdot \delta \\ L_{1,3} + v_{1,3} &= 1 \cdot x_{1,2} + 1 \cdot x_{2,3} + 0 \cdot x_{3,4} + 0 \cdot x_{4,5} + 0 \cdot x_{5,6} + 0 \cdot x_{6,7} - 1 \cdot \delta \\ &\vdots \\ L_{6,7} + v_{1,2} &= 0 \cdot x_{1,2} + 0 \cdot x_{2,3} + 0 \cdot x_{3,4} + 0 \cdot x_{4,5} + 0 \cdot x_{5,6} + 1 \cdot x_{6,7} - 1 \cdot \delta \end{aligned}$$

Iz funkcijskih jednadžbi formira se matrica koeficijenata jednadžbi popravaka \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

te se određuje vektor približnih vrijednosti nepoznanica \mathbf{x}_0 . Budući da je svako mjerenje obavljeno s jednakom točnošću, pridružuje mu se težina s vrijednošću 1 pa se stoga matrica koeficijenata normalnih jednadžbi \mathbf{N} formira po relaciji:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}.$$

Vektor prikraćenih vrijednosti mjerenja $-\mathbf{l}$ računa se izrazom:

$$-\mathbf{l} = \mathbf{f}_0 - \mathbf{L},$$

pa je vektor apsolutnih članova normalnih jednadžbi:

$$-\mathbf{n} = -\mathbf{A}^T \mathbf{l}.$$

Rješenje normalnih jednadžbi dobije se izrazom:

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} = \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{n},$$

gdje su:

\mathbf{x} – vektor prikraćenih vrijednosti nepoznanica,

\mathbf{Q}_{xx} – matrica kofaktora nepoznanica.

Vektor izjednačenih vrijednosti nepoznanica $\bar{\mathbf{x}}$ računa se izrazom:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{x}.$$

Vektor popravaka izjednačenih mjerenja računa se izrazom:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l},$$

a vektor izjednačenih mjerenja:

$$\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{v}.$$

Referentno standardno odstupanje s_0 računa se prema izrazu:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n_f}},$$

gdje su:

n – broj mjerenja,

u – broj nepoznanica,

n_f – broj stupnjeva slobode,

$$n_f = n - u = 21 - 7 = 14.$$

Budući da je svakom mjerenju pridružena težina s vrijednošću 1, ocjena točnosti pojedinih mjerenja identična je referentnom standardnom odstupanju, odnosno $s_i = s_0$.

Standardno odstupanje nepoznanica računa se izrazima:

$$s_{x_i} = s_0 \sqrt{q_{x_i x_i}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \text{ i } s_{x_r} = s_0 = s_0 \sqrt{q_{x_r x_r}},$$

gdje je:

$q_{x_i x_i}$ – kofaktor pojedine nepoznanice (i -ti dijagonalni član matrice \mathbf{Q}_{xx}).

Standardno odstupanje izjednačenih mjerenja računa se izrazom:

$$\bar{s}_i = s_0 \sqrt{\bar{q}_{ii}},$$

gdje je:

\bar{q}_{ii} – kofaktor pojedinog izjednačenog mjerenja (i -ti dijagonalni član matrice kofaktora izjednačenih mjerenja $\bar{\mathbf{Q}} = \mathbf{A}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{A}^T$).

3.1.4. Statistički testovi

Statistički testovi provode se samo u postupku potpunog ispitivanja. Za interpretaciju rezultata testovi se provode koristeći standardno odstupanje duljina mjerenih na baznoj liniji s , adicijsku korekciju elektrooptičkog daljinomjera δ i njeno standardno odstupanje s_δ u svrhu dobivanja odgovora na iduća pitanja:

a) je li izračunato empirijsko standardno odstupanje s manje od odgovarajućeg standardnog odstupanja σ deklariranog od proizvođača ili manje od neke druge predodređene vrijednosti σ ?

b) pripadaju li dva empirijska standardna odstupanja s i \tilde{s} , dobivena iz dviju sesija u kojima je mjereno istim instrumentom u različito vrijeme ili različitim instrumentima, istom skupu pretpostavljajući da oba imaju isti broj stupnjeva slobode n_f ?

c) je li adicijska korekcija δ jednaka nuli kako je deklarirano od proizvođača ($\delta = 0$?) ili, ako je za prizmu poznata vrijednost adicijske korekcije, je li $\delta = \delta_0$?

Za testove koji slijede (tablica 1) uzima se razina pouzdanosti od $1 - \alpha = 0,95$.

Tablica 1. Statistički testovi.

Pitanje	Nulta hipoteza (H_0)	Alternativna hipoteza (H_1)
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$s = \tilde{s}$	$s \neq \tilde{s}$
c)	$\delta = \delta_0$	$\delta \neq \delta_0$

Test a)

Nulta hipoteza navodi da je empirijsko standardno odstupanje s manje ili jednako teorijskoj ili unaprijed određenoj vrijednosti σ te se prihvaća ako je zadovoljeno:

$$s_0 \leq \sigma \cdot \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(n_f)}{n_f}},$$

$$s_0 \leq \sigma \cdot \sqrt{\frac{23,68}{14}} = 1,30 \cdot \sigma. \quad (26)$$

U protivnom, prihvaća se alternativna hipoteza.

Test b)

U slučaju dviju različitih sesija test pokazuje pripadaju li empirijska standardna odstupanja s i \tilde{s} istom uzorku. Nulta hipoteza prihvaća se ako je zadovoljeno:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(n_f, n_f)} \leq \frac{s_0^2}{\tilde{s}_0^2} \leq F_{1-\alpha/2}(n_f, n_f),$$

$$0,34 \leq \frac{s_0^2}{\tilde{s}_0^2} \leq 2,98. \quad (27)$$

U protivnom, prihvaća se alternativna hipoteza.

Test c)

Nulta hipoteza jednakosti adicijskih korekcija daljinomjera prihvaća se ako je zadovoljeno:

$$|\delta - \delta_0| \leq s_\delta \cdot t_{1-\alpha/2}(n_f),$$

$$|\delta - \delta_0| \leq 2,14 \cdot s_\delta. \quad (28)$$

U protivnom, prihvaća se alternativna hipoteza.

4. Ispitivanje preciznosti mjerenja duljina geodetskim mjernim stanicama Leica TC2003, Leica TCA2003 i Leica TCRP1201

Mjerenja na kalibracijskoj bazi provedena su 20. travnja 2016. od 10:30 do 15:10 sati geodetskim mjernim stanicama Leica TC2003, Leica TCA2003 i Leica TCRP1201 (tablica 2). Izmjerena je 21 dužina između sedam stupova koji su na međusobnoj udaljenosti približno 100 metara, odnosno ukupne udaljenosti od

prvog do posljednjeg stupa približno 600 m. Instrumentima Leica TC2003 i TCA2003 duljine su mjerene podatkom mjerenja od 0,1 mm, dok su instrumentom Leica TCRP1201 mjerene podatkom od 1 mm, uz stalno korištenje pribora za prisilno centriranje. Svako pojedino mjerenje obavljeno je u pet ponavljanja iz kojih se izračunala aritmetička sredina.

Tablica 2. Tehničke specifikacije elektrooptičkih daljinomjera.

Parametar	Leica TC2003	Leica TCA2003	Leica TCRP1201
Domet (GPR1 – precizna prizma)	2500 m	2500 m	3000 m
Mjerna nesigurnost	1 mm + 1 ppm	1 mm + 1 ppm	1 mm + 1,5 ppm

Mjerenja su obavljena tako da su duljine izmjerene na jednom stajalištu svim tri- ma instrumentima, a zatim su preseljeni na iduće. Za vrijeme mjerenja duljina na svakom stajalištu pri početku i završetku mjerenja svakim pojedinim instrumen- tom izmjereni su i atmosferski parametri meteorološkim mjernim uređajem Thom- men HM30 (URL 3, tablica 3). Za mjerenja između opažanja atmosferskih uvjeta, vrijednosti su interpolirane linearnom metodom zbog izračuna prve brzinske ko- rekcije za svaku pojedinu duljinu.

Tablica 3. Atmosferski parametri opažani tijekom mjerenja duljina.

Stajalište	Vrijeme	Temperatura	Tlak	Vlažnost zraka
		[°C]	[hPa]	[%]
ST1	10:30	17,0	1011,3	45,0
ST1	11:00	16,7	1011,1	43,9
ST1	11:30	16,2	1011,3	41,1
ST1	11:55	16,9	1011,2	38,9
ST2	12:05	16,9	1011,2	38,6
ST2	12:30	17,9	1011,3	38,0
ST2	13:05	19,6	1011,2	34,2
ST3	13:15	19,6	1011,0	32,4
ST3	13:30	19,6	1010,9	30,5
ST3	14:00	20,7	1011,0	30,2
ST4	14:05	20,7	1011,0	30,2
ST4	14:35	21,1	1010,8	29,6
ST5	14:40	21,4	1010,8	29,2
ST5	15:00	22,3	1010,5	27,8
ST6	15:05	22,4	1010,6	27,8
ST6	15:10	22,5	1010,6	27,8

U tablicama 4, 5 i 6 prikazani su rezultati ispitivanja preciznosti elektrooptičkih daljinomjera dobiveni programom ISO_DISTANCE, a u tablicama 7, 8 i 9 rezulta- ti statističkih testova za obavljena mjerenja.

Tablica 4. Ispitivanje preciznosti elektrooptičkog daljinomjera geodetske mjerne stanice Leica TC2003.

Datum mjerenja:		20.4.2016.		Instrument:		Leica TC2003	
Dužina	Stajalište	Reflektor	$\bar{L}_{s_{0,q}}$ [m]	ΔD_1 [ppm]	K_1 [m]	L [m]	
1	1	2	99,9818	5,4	0,0005	99,9824	
2	1	3	200,0001	5,4	0,0011	200,0012	
3	1	4	299,9680	5,3	0,0016	299,9696	
4	1	5	400,0085	5,3	0,0021	400,0106	
5	1	6	499,9689	5,2	0,0026	499,9715	
6	1	7	599,9718	5,2	0,0031	599,9749	
7	2	3	100,0183	6,2	0,0006	100,0189	
8	2	4	199,9856	6,4	0,0013	199,9869	
9	2	5	300,0259	6,6	0,0020	300,0279	
10	2	6	399,9865	6,8	0,0027	399,9893	
11	2	7	499,9889	7,0	0,0035	499,9924	
12	3	4	99,9674	7,9	0,0008	99,9682	
13	3	5	200,0076	7,9	0,0016	200,0092	
14	3	6	299,9682	7,9	0,0024	299,9705	
15	3	7	399,9706	7,9	0,0032	399,9738	
16	4	5	100,0402	9,1	0,0009	100,0411	
17	4	6	200,0005	9,2	0,0018	200,0024	
18	4	7	300,0030	9,4	0,0028	300,0058	
19	5	6	99,9604	9,7	0,0010	99,9614	
20	5	7	199,9627	9,7	0,0019	199,9646	
21	6	7	100,0022	10,6	0,0011	100,0033	

Vektor približnih nepoznanica [m]	Vektor prikraćenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih mjerenja [m]	Standardno odstupanje izjednačenih mjerenja [m]
100,0000	-0,0176	99,9824	99,9825	$s_1 = 0,00008$
100,0000	0,0187	100,0187	200,0013	$s_2 = 0,00007$
100,0000	-0,0319	99,9681	299,9694	$s_3 = 0,00007$
100,0000	0,0410	100,0410	400,0104	$s_4 = 0,00007$
100,0000	-0,0387	99,9613	499,9717	$s_5 = 0,00007$
100,0000	0,0033	100,0033	599,9750	$s_6 = 0,00008$
0,0000	-0,0001	-0,0001	100,0188	$s_7 = 0,00008$
			199,9869	$s_8 = 0,00007$
			300,0280	$s_9 = 0,00007$
			399,9892	$s_{10} = 0,00007$
			499,9925	$s_{11} = 0,00007$
			99,9682	$s_{12} = 0,00008$
			200,0092	$s_{13} = 0,00007$
			299,9705	$s_{14} = 0,00007$
			399,9738	$s_{15} = 0,00007$
			100,0411	$s_{16} = 0,00008$
			200,0024	$s_{17} = 0,00007$
			300,0056	$s_{18} = 0,00007$
			99,9613	$s_{19} = 0,00008$
			199,9646	$s_{20} = 0,00007$
			100,0034	$s_{21} = 0,00008$

Referentno standardno odstupanje [m]	$s_0 = 0,00013$

Standardno odstupanje mjerenja [m]	$s_1 = 0,00013$

Standardno odstupanje nepoznanica [m]	s_{1-21}
	$s_{s_1} = 0,00007$
	$s_{s_2} = 0,00007$
	$s_{s_3} = 0,00007$
	$s_{s_4} = 0,00007$
	$s_{s_5} = 0,00007$
	$s_{s_6} = 0,00007$
	$s_{s_7} = 0,00006$

Tablica 5. Ispitivanje preciznosti elektrooptičkog daljinomjera geodetske mjerne stanice Leica TCA2003.

Datum mjerenja:	20.4.2016.		Instru- ment:	Leica TCA2003		
Duzina					L [m]	
Stajalište					K_1 [m]	
Reflektor					ΔD_1 [ppm]	
					$\bar{L}_{r_{0,q}}$ [m]	
1	1	2	99,9821	5,2	0,0005	99,9826
2	1	3	200,0004	5,1	0,0010	200,0014
3	1	4	299,9679	5,1	0,0015	299,9694
4	1	5	400,0085	5,0	0,0020	400,0105
5	1	6	499,9695	5,0	0,0025	499,9720
6	1	7	599,9718	4,9	0,0030	599,9748
7	2	3	100,0184	5,5	0,0006	100,0189
8	2	4	199,9860	5,7	0,0011	199,9872
9	2	5	300,0265	5,8	0,0017	300,0282
10	2	6	399,9870	6,0	0,0024	399,9894
11	2	7	499,9896	6,2	0,0031	499,9926
12	3	4	99,9672	7,9	0,0008	99,9680
13	3	5	200,0079	8,1	0,0016	200,0095
14	3	6	299,9685	8,3	0,0025	299,9709
15	3	7	399,9707	8,4	0,0034	399,9741
16	4	5	100,0404	9,0	0,0009	100,0413
17	4	6	200,0008	9,0	0,0018	200,0026
18	4	7	300,0032	9,1	0,0027	300,0059
19	5	6	99,9601	9,7	0,0010	99,9611
20	5	7	199,9627	10,0	0,0020	199,9647
21	6	7	100,0023	10,7	0,0011	100,0033

Vektor približnih nepoznanica [m]	Vektor prikraćenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih mjerenja [m]	Standardno odstupanje izjednačenih mjerenja [m]
100,0000	-0,0176	99,9824	99,9825	$s_1 = 0,00011$
100,0000	0,0188	100,0188	200,0013	$s_2 = 0,00010$
100,0000	-0,0319	99,9681	299,9694	$s_3 = 0,00010$
100,0000	0,0412	100,0412	400,0106	$s_4 = 0,00010$
100,0000	-0,0387	99,9613	499,9719	$s_5 = 0,00010$
100,0000	0,0032	100,0032	599,9751	$s_6 = 0,00011$
0,0000	-0,0001	-0,0001	100,0189	$s_7 = 0,00011$
			199,9870	$s_8 = 0,00010$
			300,0282	$s_9 = 0,00010$
			399,9895	$s_{10} = 0,00010$
			499,9927	$s_{11} = 0,00010$
			99,9682	$s_{12} = 0,00011$
			200,0095	$s_{13} = 0,00010$
			299,9707	$s_{14} = 0,00010$
			399,9739	$s_{15} = 0,00010$
			100,0414	$s_{16} = 0,00011$
			200,0026	$s_{17} = 0,00010$
			300,0058	$s_{18} = 0,00010$
			99,9614	$s_{19} = 0,00011$
			199,9646	$s_{20} = 0,00010$
			100,0033	$s_{21} = 0,00011$

Referentno standardno odstupanje [m]	Standardno odstupanje mjerenja [m]	Standardno odstupanje nepoznanica [m]
$s_0 = 0,00018$	$s_1 = 0,00018$	$s_{21} = 0,00010$
		$s_{22} = 0,00010$
		$s_{23} = 0,00010$
		$s_{24} = 0,00010$
		$s_{25} = 0,00010$
		$s_{26} = 0,00010$
		$s_{27} = 0,00008$

Tablica 6. Ispitivanje preciznosti elektrooptičkog daljinomjera geodetske mjerne stanice Leica TCRP1201.

Datum mjerenja:		20.4.2016.		Instrument:		Leica TCRP1201	
Dužina	Stajalište	Reflektor	$\bar{L}_{s,q}$ [m]	ΔD_1 [ppm]	K_1 [m]	L [m]	
1	1	2	99,982	5,0	0,000	99,982	
2	1	3	200,000	5,1	0,001	200,001	
3	1	4	299,968	5,1	0,002	299,969	
4	1	5	400,009	5,2	0,002	400,011	
5	1	6	499,969	5,3	0,003	499,972	
6	1	7	599,972	5,3	0,003	599,975	
7	2	3	100,019	7,1	0,001	100,019	
8	2	4	199,986	7,3	0,001	199,987	
9	2	5	300,026	7,5	0,002	300,028	
10	2	6	399,987	7,7	0,003	399,990	
11	2	7	499,989	7,9	0,004	499,993	
12	3	4	99,967	8,4	0,001	99,968	
13	3	5	200,008	8,6	0,002	200,010	
14	3	6	299,968	8,8	0,003	299,970	
15	3	7	399,971	9,0	0,004	399,974	
16	4	5	100,040	9,0	0,001	100,041	
17	4	6	200,001	9,0	0,002	200,002	
18	4	7	300,003	9,0	0,003	300,006	
19	5	6	99,960	9,0	0,001	99,961	
20	5	7	199,962	10,6	0,002	199,965	
21	6	7	100,002	10,6	0,001	100,003	

Vektor približnih nepoznanica [m]	Vektor prikraćenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih nepoznanica [m]	Vektor izjednačenih mjerenja [m]	Standardno odstupanje izjednačenih mjerenja [m]
100,0000	-0,018	99,982	99,982	$s_1 = 0,00015$
100,0000	0,019	100,019	200,001	$s_2 = 0,00014$
100,0000	-0,032	99,968	299,969	$s_3 = 0,00013$
100,0000	0,041	100,041	400,011	$s_4 = 0,00013$
100,0000	-0,039	99,961	499,972	$s_5 = 0,00014$
100,0000	0,003	100,003	599,975	$s_6 = 0,00015$
0,0000	0,000	0,000	100,019	$s_7 = 0,00015$
			199,987	$s_8 = 0,00014$
			300,029	$s_9 = 0,00013$
			399,990	$s_{10} = 0,00013$
			499,993	$s_{11} = 0,00014$
			99,968	$s_{12} = 0,00015$
			200,009	$s_{13} = 0,00014$
			299,971	$s_{14} = 0,00013$
			399,974	$s_{15} = 0,00013$
			100,041	$s_{16} = 0,00016$
			200,002	$s_{17} = 0,00014$
			300,006	$s_{18} = 0,00013$
			99,961	$s_{19} = 0,00015$
			199,965	$s_{20} = 0,00014$
			100,003	$s_{21} = 0,00013$

Vektor nepoznanica [m]	Referentno standardno odstupanje [m]
$s_0 = 0,00024$	

Vektor nepoznanica [m]	Standardno odstupanje mjerenja [m]
$s_1 = 0,00024$	

Vektor nepoznanica [m]	Standardno odstupanje nepoznanica [m]
$s_{15} = 0,00013$	
$s_{16} = 0,00013$	
$s_{17} = 0,00013$	
$s_{18} = 0,00013$	
$s_{19} = 0,00013$	
$s_{20} = 0,00013$	
$s_{21} = 0,00011$	

Tablica 7. *Statistički test a).*

	TC2003	TCA2003	TCRP1201
H_0	$s \leq \sigma$	$s \leq \sigma$	$s \leq \sigma$
H_1	$s > \sigma$	$s > \sigma$	$s > \sigma$
s [m]	0,00013	0,00018	0,00024
$\sigma(600\text{ m})$ [m]	0,00160	0,00160	0,00190
$\sigma_{0,95}(600\text{ m})$ [m]	0,00208	0,00208	0,00247
Uz 95% vjerojatnosti: ($\alpha = 0,05$)	Hipoteza se prihvaća: mjerena su obavljena s predviđenom točnosti.	Hipoteza se prihvaća: mjerena su obavljena s predviđenom točnosti.	Hipoteza se prihvaća: mjerena su obavljena s predviđenom točnosti.

Tablica 8. *Statistički test b).*

	TC2003 / TCA2003		TC2003 / TCRP1201		TCA2003 / TCRP1201	
H_0	$s = \tilde{s}$		$s = \tilde{s}$		$s = \tilde{s}$	
H_1	$s \neq \tilde{s}$		$s \neq \tilde{s}$		$s \neq \tilde{s}$	
s_0 [m]	$s_{0\text{TC2003}}$	0,00013	$s_{0\text{TC2003}}$	0,00013	$s_{0\text{TCA2003}}$	0,00018
\tilde{s}_0 [m]	$\tilde{s}_{0\text{TCA2003}}$	0,00018	$\tilde{s}_{0\text{TCRP1201}}$	0,00024	$\tilde{s}_{0\text{TCRP1201}}$	0,00024
$\frac{s_0^2}{\tilde{s}_0^2}$	0,50		0,27		0,54	
Uz 95% vjerojatnosti: ($\alpha = 0,05$)	Hipoteza se prihvaća: standardna odstupanja pripadaju istom uzorku.		Hipoteza se ne prihvaća: standardna odstupanja ne pripada- ju istom uzorku.		Hipoteza se prihvaća: standardna odstupanja pripadaju istom uzorku.	

Tablica 9. *Statistički test c).*

	TC2003	TCA2003	TCRP1201
H_0	$\delta = \delta_0$	$\delta = \delta_0$	$\delta = \delta_0$
H_1	$\delta \neq \delta_0$	$\delta \neq \delta_0$	$\delta \neq \delta_0$
δ [m]	-0,00008	-0,00014	0,00001
δ_0 [m]	0,00000	0,00000	0,00000
$ \delta - \delta_0 $ [m]	0,00008	0,00014	0,00001
s_δ [m]	0,00006	0,00008	0,00011
$s_{\delta(0,975)}$ [m]	0,00012	0,00017	0,00023
Uz 97,5% vjerojatnosti: ($\alpha = 0,05$)	Hipoteza se prihvaća: adicijska korekcija je unutar deklarirane vrijednosti.	Hipoteza se prihvaća: adicijska korekcija je unutar deklarirane vrijednosti.	Hipoteza se prihvaća: adicijska korekcija je unutar deklarirane vrijednosti.

5. Zaključak

U geodeziji 21. stoljeća precizno mjerenje duljina elektrooptičkim daljinomjerom uobičajena je praksa. Kako bi podaci dobiveni takvim mjerenjem bili pouzdani, potrebno je ispitati preciznost elektrooptičkog daljinomjera periodično ili prije radova koji zahtijevaju veću preciznost mjerenja.

Kada se uklone svi vanjski utjecaji na mjerenje duljina te se duljina reducira na horizont, potrebno je ocijeniti kolika je mjerna nesigurnost rezultata mjerenja, tj. je li ona unutar vrijednosti koju je deklarirao proizvođač u tehničkim specifikacijama instrumenta. International Organization for Standardization (ISO) i Hrvatski zavod za norme (HZN) daju način za određivanje preciznosti elektrooptičkih daljinomjera normom ISO 17123-4:2012 koja opisuje postupak ispitivanja. Terenski i računski postupci opisani u navedenoj normi nisu kompleksni i omogućuju svakome mogućnost ispitivanja instrumentarija koji posjeduju.

U ovom radu ispitani su elektrooptički daljinomjeri na geodetskim mjernim stanicama Leica TC2003, Leica TCA2003 i Leica TCRP1201 prema normi ISO 17123-4:2012. Terenska mjerenja provedena su na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, dok je obrada mjerenja obavljena u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Za potrebe obrade izrađen je računalni program ISO_DISTANCE, u kojem se kao ulazne vrijednosti upisuju podaci mjerenja duljina i mjereni atmosferski parametri, a kao izlazne vrijednosti dobivaju se konačne vrijednosti mjerenih duljina, ocjena točnosti mjerenja i nepoznanica te podaci statističkog testiranja za odgovarajuće statističke testove.

Postupak ispitivanja pokazao je da su empirijske vrijednosti standardnih odstupanja manje od vrijednosti deklariranih u tehničkim specifikacijama proizvođača, tj. sva su tri daljinomjerna modula geodetskih mjernih stanica u potpunosti ispravna.

Literatura

- Afeni, T. B. (2011): *An Approach to Eradicate the Effects of Atmospheric Variations on Total Station Distance Measurement in a Surface Mine Environment: The impact of taking measurement through a glass medium*, PhD Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- Barković, Đ., Zrinjski, M. (2015): *Terenska mjerenja*, skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Barković, Đ., Zrinjski, M., Udovičić, D. (2014): *Automation of Testing of Geodetic Measuring Instruments*, Conference Proceedings, Volume II – 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014, Sofia, 89–96.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008): *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici*, Školska knjiga, Zagreb.
- Borčić, B. (1976): *Gauss-Krügerova projekcija meridijanskih zona*, Liber, Zagreb.
- Državna geodetska uprava (2009): *Tehničke specifikacije za postupke računanja i podjelu na listove službenih karata i detaljne listove katastarskog plana u kartografskoj projekciji Republike Hrvatske – HTRS96/TM, verzija 1.0*, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Feil, L. (1989): *Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – prvi dio*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Frančula, N., Lapaine, M. (2008): *Geodetsko-geoinformatički rječnik*, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Höpcke, W. (1965): *Eine Studie über die Korrelation elektromagnetisch gemessener Strecken*, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 72, No. 4, 140–147.
- Höpcke, W. (1966): *On the Curvature of Electromagnetic Waves and its Effects on Measurement of Distance*, Survey Review, Vol. 18, No. 141, 3, 298–312.
- HRN ISO (2014): *HRN ISO 17123-4:2014, Optika i optički instrumenti – Terenski postupci za ispitivanje geodetskih instrumenata i instrumenata izmjere – 4. dio: Elektrooptički daljinomjeri (EDM instrumenti)*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
- ISO (2012): *ISO 17123-4:2012, Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)*, International Organization for Standardization, Geneva.
- Kogoj, D. (2006): *Mjerenje dužina elektronskim daljinomjerima*, Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, Sarajevo.
- Leica (2000): *TPS – System 1000, User Manual*, Leica Geosystems AG, Heerbrugg.
- Rezo, M. (2013): *Ravninska geodezija – zbirka zadataka*, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin.
- Rožić, N. (2007): *Računska obrada geodetskih mjerenja*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Zrinjski, M. (2010): *Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a*, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Razumović, I. (2010): *Automatizacija ispitivanja preciznosti nivelira i umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi*, Geodetski list, 64 (87), 4, 279–296.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Tir, M. (2011): *Automatizacija ispitivanja preciznosti teodolita prema normi HRN ISO 17123-3:2004*, Geodetski list, 65 (88), 2, 123–144.

Zrinjski, M., Barković, Đ., Čulić, D. (2013): Precision Testing of Electronic Tacheometer according to the Standard ISO 17123-5:2005, Conference Proceedings, Volume II – 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013, Sofia, 351–358.

Zrinjski, M., Barković, Đ., Herent, M. (2015): Testing the Precision of GNSS RTK Measuring Systems by Applying of Computer Programme, Conference Proceedings, Volume II – 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, Sofia, 499–506.

Mrežne adrese

URL 1: Hrvatski zavod za norme – HZN,
<http://www.hzn.hr/default.aspx?id=89>, (2. 11. 2016.).

URL 2: International Organization for Standardization – ISO,
<http://www.iso.org/iso/home.html>, (2. 11. 2016.).

URL 3: THOMMEN Meteo Station HM30,
<http://easthillsinstruments.com/datasheet/HM30.pdf>, (2. 11. 2016.).

Automation of Testing the Precision of Electro-Optical Distance Meters at the Calibration Baseline

ABSTRACT. This paper presents corrections and reductions of distances measured by electro-optical distance meters to their final value in the plane of the Republic of Croatia cartographic projection – HTRS96/TM. To rely on measurements obtained by electro-optical distance meters it is necessary to test them periodically or optionally before jobs which demand more precise and reliable measurement. For field testing of electro-optical distance meters the International Standard ISO 17123-4:2012 has been adopted, which describes simplified and full test procedure for field testing of the precision, as well as evaluating the uncertainty of measurement. Full test procedure of testing the precision of electro-optically measured distances by geodetic stations Leica TC2003, Leica TCA2003 and Leica TCRP1201 at the calibration baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb, is presented thoroughly. For the purpose of automating the field testing procedure, the computer program ISO_DISTANCE has been developed according to Standard ISO 17123-4:2012.

Keywords: electro-optical distance meter, correction, reduction, precision, calibration baseline.

Primljeno / Received: 2016-11-05

Prihvaćeno / Accepted: 2016-12-10