

BRZINA SVJETLOSTI U MJERENJU DUŽINA ELEKTRONSKIM DALJINOMJERIMA

Veljko PETKOVIĆ — Zagreb

Brzi razvoj elektronskih daljinomjera, tačnost koja se s njima postiže, ekonomičnost i lakoća kojom se koriste pri radu, pruža danas geodetskoj praksi i nauci jedno kvalitativno novo pomagalo.

Osnovni podatak koji prilikom mjerenja dužina elektronskim daljinomjerima treba mjeriti jeste vrijeme, koje je potrebno da signal odaslan sa jednog kraja dužine dođe do drugog kraja, gdje se reflektira i vraća ponovno u odašiljač. Na glavnoj stanici mjeri se vrijeme potrebno za dvostruki put signala od odašiljača do reflektora i natrag, ili fazni pomak odaslanog i reflektiranog vala ili pak interferencija koja nastaje među valovima uslijed različite dužine prevaljenog puta. Određuje se dakle dvostruki put signala koji je dat izrazom $2D = c \times t$ (1)

gdje je D = pređeni put, c = brzina signala elektromagnetskog vala, t = vrijeme.

Sa glavne stanice elektronski daljinomjer odašilje signal, a reflektira ga sa pomoćne stanice na drugom kraju dužine slični ili potpuno isti elektronski daljinomjer ili samo reflektor u obliku antene, zrcala ili kombiniranih sistema prizama.

Val nosač koji prenosi signal može biti radio tehnički, mikrovalni ili svjetlosni. Prema tome el. daljinomjeri koji su do danas u upotrebi mogu biti: a — radio-tehnički, b — mikrovalni, c — elektrooptički, d — laserski.

Prema načinu i metodi mjerenja vremena potrebnog da signal pređe određeni put mogu el. daljinomjeri biti

1 — impulsni, 2 — fazni i 3 — interferencioni

Vrijeme prolaza signala mjeri se u milimikrosekundama tj. 10^{-9} sec (milijarditi dio sekunde nanosekunda).

Današnji razvoj mjerne tehnike omogućava veoma tačno određivanje vremena t , odnosno razlike vremena Δt odaslanog i reflektiranog signala. Zato će tačnost mjerenja dužine uglavnom ovisiti o faktoru c i njegovim komponentama. Prema tome brzina kojom se rasprostiru elektromagnetski valovi atmosferom predstavlja mjerilo, a njihova valna dužina jedinicu toga mjerila.

$$\text{Prema jednadžbi J. C. Maxwella} \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2)$$

(c_0 = brzina elektromagnetskih valova u vakuumu, ϵ = dielektrična konstanta, μ = konstanta magnetskog permeabiliteta) određuje se brzina c rasprosti-

ranja elektromagnetskih valova u stvarnim atmosferskim uvjetima koji vladaju u toku mjerenja.

Brzina širenja valova u vakuumu, kao jednom neutralnom mediumu,, predstavlja onda zapravo osnovnu komparativnu veličinu u elektronskom mjerenju dužina. Ta je brzina za sve elektromagnetske valove ista, konstantna veličina.

Interes konstruktora, a i geodeta za što tačnije određivanje ove veličine u zadnja dva decenija bio je potpuno razumljiv.

Problemom određivanja brzine svjetlosti bavili su se istraživači još u XVII st. Od tada pa do najnovijih vremena brzinu svjetlosti su određivali raznim metodama i naravno uz to i različitom tačnošću, kao što je vidljivo iz tabele I.

Tabela I

godina	autor	metodom mjerenja	brzina km/sec
1676	Roemer	astronomskom	214 300,0
1725	Bradley	astronomskom	295 000,0 \pm 5000
1849	Fizeau	rotirajućim nazubljenim kotačem	315 300,0 \pm 500
1856	Kohlrausch Weber	Komparacijom elektrostatičkih i elektromagnetskih vrijednosti	310 800,0
1862	Faucault	rotirajućim zrcalom	298 600,0 \pm 500
1868	Maxwell	komparacijom elektrostatičkih i elektromagnetskih vrijednosti	284 300,0
1874	Cornu	rotirajućim nazubljenim kotačem	300 030,0 \pm 200
1879	Michelson	rotirajućim zrcalom	299 910,0 \pm 50
1882	Newcomb	rotirajućim zrcalom	299 860,0 \pm 30
1882	Michelson	rotacionim spektrom	299 853,0 \pm 60
1902	Perrotin	rotirajućim nazubljenim kotačem	299 880,0 \pm 84
1906	Rosa, Dorsey	Komparacijom elektrostatičkih i dinamičnih jedinica	299 784,0 \pm 30
1924	Michelson	rotirajućim zrcalom	299 802,0 \pm 30
1926	Michelson	rotirajućim zrcalom	299 796,0 \pm 4
1928	Karolus, Mittelstaedt	dvostruka Kerrova ćelija	299 786,0 \pm 20
1929	Mittelstaedt	moduliranim svjetlom-Kerrovom ćelijom	299 778,0 \pm 20
1929	Karolus, Mittelstaedt	rotacionim nazubljenim kotačem	299 786,0 \pm 20
1932	Michelson, Paese	rotacionim zrcalom	299 774,0 \pm 11
1935	Michelson, Paese	rotacionim zrcalom	299 774,0 \pm 11
1937	Anderson	Kerrovom ćelijom	299 771,0 \pm 15
1940	Hüttel	Kerrovom ćelijom	299 768,0 \pm 10
1940	Karolus, Hüttel	Kerrovom ćelijom	299 776,0 \pm 15

1940	Hüttel	rotacionim nazubljenim kotačem	299 771,0 ± 10
1941	Anderson	rotacionim nazubljenim kotačem	299 776,0 ± 14
1942	Birge	svjetlosnom modulacijom	299 776,0 ± 4
1947	Essen-Gordon-Smith	šupljim rezonatorom	299 792,0 ± 9
1948	Essen	rezonatorom	299 792,0 ± 9
1948	Bergstrand	Kerrovom ćelijom	299 793,0 ± 2
1949	Aslakson	Shoronom	299 792,9 ± 2,4
1949	Froom	mikrovalnim radio laboratorijskim interferometrom	299 793,0 ± 0,6
1949	Houston	ultrazvučni kvarz	299 775,0 ± 9
1950	Kinley	kvarz	299 780,0 ± 7
1950	Bergstrand	modulirano svjetlo Kerrovom fotoćelijom	299 793,0 ± 0,25
1950	Essen	šupljim rezonatorom	299 792,5 ± 1
1950	Hansen, Bol	šupljim rezonatorom	299 789,3 ± 0,4
1950	Houston	ultrazvučnim modulatorom	299 782,0 ± 14
1950	Bergstrand	Kerrovom ćelijom	299 793,0 ± 0,25
1951	Aslakson	obrada geod. podataka	299 794,2 ± 1,4
1951	Essen	rezonatorom	299 792,5 ± 3
1952	Bol	rezonatorom	299 789,3 ± 0,4
1952/55	razni	na spektralnoj traci	299 776,0 792,0
1952	Froome	mikrovalnim interferometrom	299 792,6 ± 0,7
1952	Bergstrand	geodimetrom	299 793,1 ± 0,25
1952	A. I. Kartašev	optičkim interferecionim modulatorom	299 788,0 ± 5,4
1953	Mak Keizi	geodimetrom	299 792,3 ± 0,5
1953	Froome	mikrovalnim interferometrom	299 793,6 ± 0,3
1954	Veličko, Vasiljev	nazubljenim kotačem	299 793,9 ± 1,0
1955	Plyler, Blaine Connor	rotirajućim spektrom	299 792,0 ± 4
1955	Schöldström	Kerrovom ćelijom	299 792,4 ± 0,4
1955	Florman	terenskim radiointerferometrom	299 796,1 ± 3,1
1955	Veličko, Vasiljev	optički SVV-1	299 793,9 ± 1,0
1956	Uodli	teluometrom	299 792,49 ± 0,3
1956	Froome	radiointerferometrom	299 792,50 ± 0,1
1958	Froome	mikrovalnim interferometrom	299 792,5 ± 0,10
1959	P. E. Lazanov	geodimetrom	299 792,5 ± 0,1
1960/61	Korolus, Fries, Helmberger	ultrazvučnim modulatorom	299 791- 795

U toku II Svjetskog rata primjenjivala se vrijednost za $c_0 = 229\,774$ km/sec.

Do pred nekoliko godina koristila se je brzina rasprostiranja elektromagnetskih valova u vakuumu koja je bila jednaka: $c_0 = 299\,775$ km/sec.

Na sjednici Međunarodne unije za radio-telegrafiju 1954. usvojena je vrijednost za brzinu širenja svjetla u vakuumu $c_0 = 299\,792,0 \pm 2$ km/sec.

1957. g. prezentirano je Internacionalnoj komisiji geodetske i geofizičke unije (IGGU) u Torontu niz rezultata, a na XI plenarnoj sjednici, odlukom br. 1 preporuča se za sva elektronska mjerenja dužina u geodetske svrhe za brzinu svjetla u vakuumu vrijednost $c_0 = 299\,792,5 \pm 0,4$ km/sec.

Ovu vrijednost, koju je inače odredio svjetski učenjak M. T. Prilepin 1956. g., prihvatila je i Internacionalna Unija za naučnu radiotelegrafiju. Analizom tabele I vidi se da je u izboru veličina najveća težina data rezultatu Bergstrandovih mjerenja. Pogreška $\pm 0,4$ km/sec odgovara srednjoj kvadratnoj pogreški od $\pm 0,6$ km/sec ili relativnoj pogreški od $\pm 2,10^{-6}$. Rezultati mjerenja kao i ova usvojena veličina predstavljaju vrijednost u granicama određene tačnosti. Naknadno je utvrđeno (C. A. Edge) da se usvojena veličina bolje prilagođava rezultatima praktičnih mjerenja ako se za mjerenja sa geodimetrom uzima sa pogreškom $\pm 0,2$ km/sec, a za mjerenja sa telurometrom sa pogreškom $\pm 0,4$ km/sec. Time se smanjuje utjecaj sistematskih pogrešaka koje ostavljaju mjerenja meteoroloških podataka.

Naknada ispitivanja koja su vršena od 1956. g. (Karolus, Fries, Helmberg) ukazuju da je pogreška usvojene veličine od $\pm 0,4$ km/sec malena. Ispitivanja su vršena na bazi D. G. F. I, u Münchenu čija je dužina određena 1960/61 interferencionim komparatorom Väissaläa sa pogreškom $< 1 : 10^{-7}$. Cilj im je bio ispitivanje utjecaja sistematskih pogrešaka pri određivanju brzine svjetla raznim metodama. Izvršeno je 1000 mjerenja. Kao izvor svjetla koje je modularano ultrazvučnim modulatorom frekvencijom 16 MHz poslužila je jedna visokotlačna lampa. Pogreška mjerenja faze bila je manja od $3,10^{-6}$. Mjerenja su se razlikovala međusobno za 4 km/sec. Sračunate brzine svjetla u vakuumu kretale su se u granicama $c_{0\min} = 299\,791$ km/sec do $c_{0\max} = 299\,795$ km/sec.

Usvojenu brzinu rasprostiranja elektromagnetskih valova u vakuumu koja vrijedi za cjelokupan spektar elektromagnetskih promjena, kod korištenja decimetarskih i centimetarskih valova može se prema izrazu (2) podijeliti sa

$$\sqrt{\epsilon\mu} = n \quad (3)$$

tj. koeficijentom loma zraka za odgovarajuće meteorološke prilike u momentu mjerenja dužine. Time se dobija stvarna brzina signala u uvjetima koji su vladali u atmosferi duž putanje zrake i njene okoline i stvarno vrijeme potrebno signalu da prođe put u oba smjera u mjerilu određenom usvojenom brzinom za c_0 .

LITERATURA:

1. A. Genike: Geodezičeskie fazovje radio daljinomeri. Trudi centralnogo naučno issledovotelskogo instituta geodezii, aerosemki i kartografii. Moskva 1963.
2. Jordan (eggert) Kneissl: Handbuch der Vermessungskunde. Band VI. Die entfernungsmessung mit elektro-magnetischen Wellen und ihre geodätische Anwendung. Stuttgart 1966.
3. W. Höpche: Zum heutigen Stand der elektronischen Streckenmessungen. Z. f. O. 1959/10
4. E. Kuntz: Lichtgeschwindigkeit und Zeitmessung. A. V. N. 1962/6
5. S. Macarol: Praktična geodezija, Zagreb, 1968.
6. A. W. Kondraschkow: Elektrooptische entfernungsmessung. V.E.B. Verlag - Berlin 1961
7. K. Rinner: Über die Reduktion grosser elektronisch gemessener Entfernungen. Z. f. V. 1956/2
8. A. Karolus: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit auf einer basis von 48 m. D.G.K. Reihe B. Heft 95(1) 1963
9. S. Ivljanin: Elektronski metodi mjerenja dužina. Predavanje V. G. I.