

UDK 528.517 ME 5000
Stručni rad

PRECIZNI DALJINOMER MEKOMETER ME 5000 PRINCIP RADA I KALIBRACIJA

Dušan KOGOJ — Ljubljana*

Mekometer ME 5000 nije samo poboljšana verzija svog prethodnika ME 3000, već je zasnovan potpuno na novom principu. Neke karakteristike su im iste, ali je već na prvi pogled novi daljinomer potpuno drukčiji. Manji je, priručniji, jednostavniji za upotrebu i pre svega tačniji. Upotrebom lasera kao nosioca oscilovanja povećan je domet. Kontrolu osnovne frekvencije u prostornom rezonatoru preuzeo je sintetizator, koji neprekidno emituje modulacionu frekvenciju, te su time otklonjene brojne teškoće.

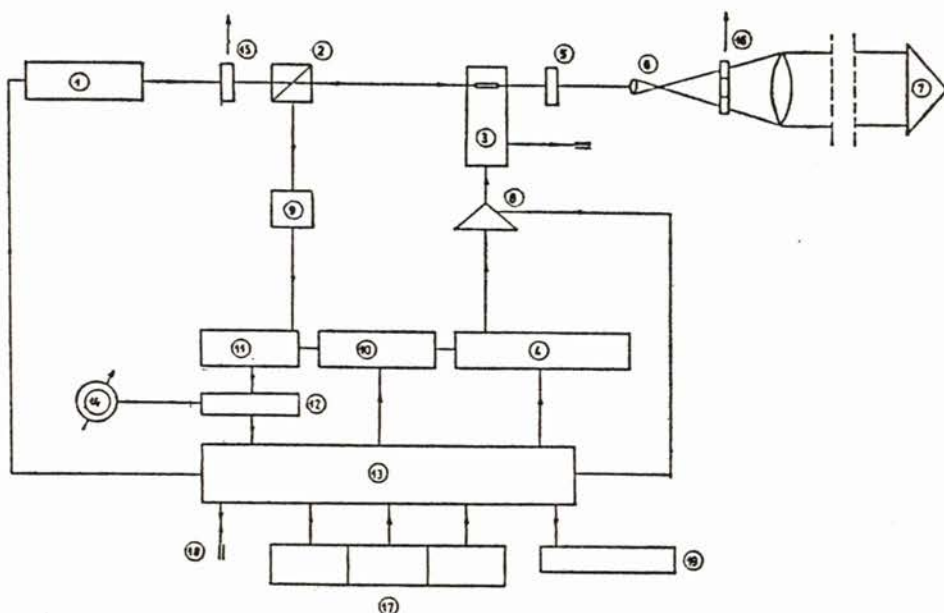
1. PRINCIP RADA

Izvor nosećih oscilacija je He—Ne laser, koji neprekidno emituje linearno polarizovanu svetlost talasne dužine 632,8 nm. Preko filtera (15) prolazi zrak kroz polarizacioni delitelj, koji ne utiče na njega. U modulatoru (3) se zrak polarizacijski modulira. Spoljni napon frekvencije približno 500 MHz, čiji izvor je kristal kvarca i kojim upravlja sintetizator (4), menja optičke karakteristike elektrooptičkog kristala. Na osnovu tog napona menja se smer polarizacije svetlosti koja prolazi kroz kristal (spoljna modulacija princip Fizeaua). Modulisani svetlosni zrak preko ploče $\lambda/4$ (5), koja služi za temperaturnu kompenzaciju, izlazi preko optike za emitovanje (6) iz instrumenta i posle odbijanja od reflektora (7), vraća se nazad u instrument. Povratni zrak posle prolaza kroz $\lambda/4$ ploču, ponovo pada na elektrooptički kristal koji sada deluje kao demodulator. Ako su faze emitovanog i povratnog signala jednake, uspostavlja se prvobitna polarizacija. U tom slučaju na detekcionu diodu (9) ne pada svetlost (nulti položaj — nula). To nastaje uvek kada je merena dužina jednaka umnošku celog broja polovine modulacione talasne dužine (30 cm).

Odnos između dužine S, modulacione frekvencije f i jačine svetlosti I, koja pada na detektor, predstavljen je sledećom jednačinom (Fromme 1966):

$$I = 1/2 \{1 - \cos e [J_0 2c (U/U_m) \cos (2 S f/c)]\}, \quad (1)$$

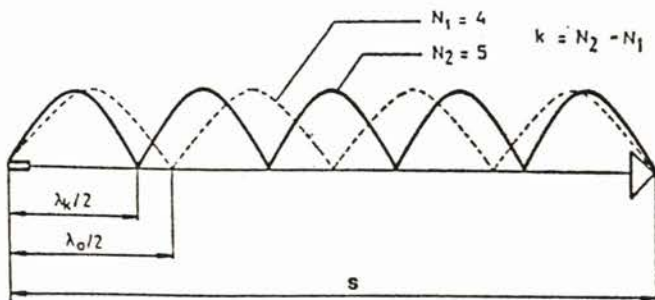
* Mr Dušan Kogoj, dipl. inž. FAGG, Ljubljana, Jamova 2.



Slika 1.1 Shema rada

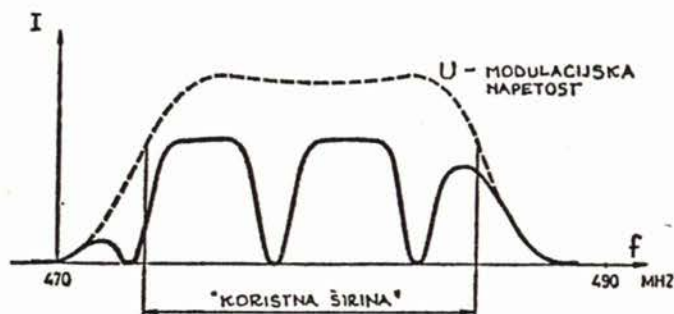
1 He-Ne laser, 2 polarizacioni delitelj, 3 modulator sa kristalom, 4 kvarcni sintetizator, 5 ploča $\lambda/4$, 6 optika za emitovanje, 7 pasivni reflektor, 8 visokofrekventno pojačalo, 9 detekciona dioda, 10 Wobbler, 11 sinhroni detektor, 12 A/D pretvarač, 13 računarska jedinica, 14 indikator jačine signala, 15 filter, 16 blenda, 17 »Range« merno područje, »Modus« način rada, 18 spoljašnje vođenje, 19 LC-Display

gde su: e ... završna eliptičnost modulirane svetlosti,
 U ... modulacioni napon,
 U_m ... potrebni napon prvog modulacionog područja,
 J_0 ... Besselova funkcija 1. vrste 0-tog reda,
 c ... brzina svetlosti.



Slika 1.2 Primer izmerene dužine jednake umnošku celog broja polovina modulacione talasne dužine $\lambda_0/2$ odn. $\lambda_k/2$, gdje je odgovarajuća modulaciona frekvencija $f_0 = c/\lambda_0$ odn. $f_k = c/\lambda_k$ (c -brzina svetlosti)

Tačno određivanje modulacione frekvencije u nultom položaju postignuto je upotrebom Wobblera. Tu se modulacioni signal sinusno, frekventno modulira frekvencijom od 2kHz i to sa korakom promene od ± 25 kHz («low range»). Time je omogućeno, da u tačno određenom nultom položaju, na detektor padne svetlost frekvencije 4kHz. Ako nulti položaj (nula) nije određen dovoljno tačno, nastupa amplitudna razlika frekvencije 2kHz. Sinhroni detektor (11) izmeri tu razliku i dalje je šalje preko A/D pretvarača (12) u računarsku jedinicu (13), koju vodi sintetizator. Određivanje nule omogućeno je promenom frekvencije sintetizatora korakom od 0.3 ppm.



Slika 1.3. Jačina svetlosti na detektoru po jednačini (1) s obzirom na ograničeno područje mod. frekvencije

Indikator jačine signala (14) prepoznaje i prikazuje jačinu signala na detektoru (9). Pri padu jačine signala ispod određene granične vrednosti prekida se merni proces. Sa određivanjem nultog položaja izvršeno je fino merenje. Celokupan broj polovina modulacionih talasnih dužina (N) izračuna se određujući razliku frekvencije dva susedna nulta položaja (kod većih dužina se nalaze veoma blizu jedan drugoga). Tačno možemo tu razliku odrediti mereći frekvenciju u »k« nultih položaja. Dužina se računa preko formule:

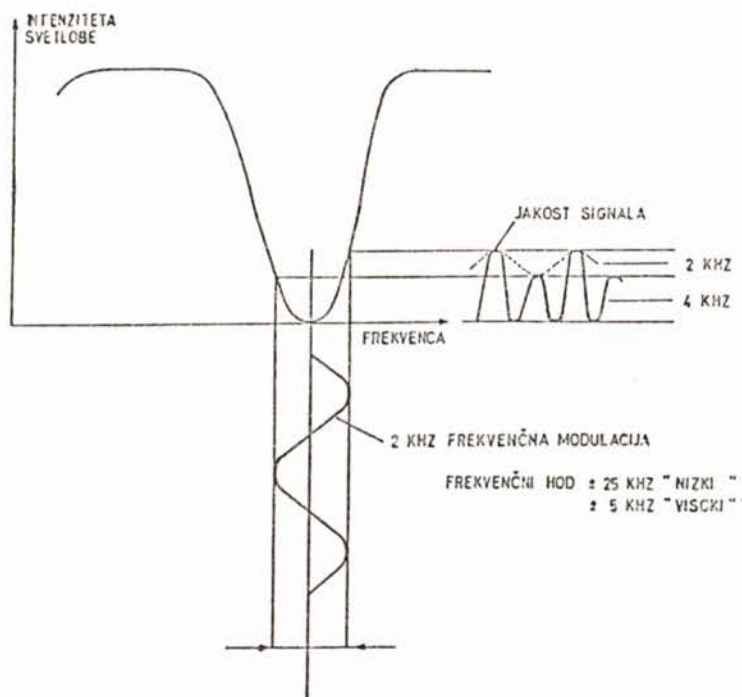
$$S = R_{nd} (k f_0 / (f_k - f_0)) / c (2f_0),$$

- gde su: k ... broj nultih položaja,
 R_{nd} ... zaokruženo na ceo broj,
 C ... brzina svetlosti (299707186,9 m/s),
 f_0 ... frekvencija prvog nultog položaja,
 f_k ... frekvencija k-tog nultog položaja.

Modulator (3) je izveden kao dvokružni rezonator. Iskorišćena je širina područja od 15 MHz (vidi sliku 1.3). Zbog termičke zavisnosti dielektrične konstante elektrooptičkog kristala pomera se modulaciono područje sa temperaturom (0,2 MHz/°C), što zahteva kontrolu. Ona se izvrši uvek prilikom uključanja instrumenta.

Određivanje broja polovina talasne dužine N ograničeno je na dužine do 10 m. U zavisnosti od ograničene razlučivosti sintetizatora isto važi i za

dužine preko 8 km. Ako znamo dužinu približno do $\pm 0,2$ m može se meriti i izvan ovih područja.



Slika 1.4 Podešavanje frekvencije za određivanje nultog položaja sa korakom od 2 kHz

1.1 Atmosferski uticaji na tačnost merenja

Vrednosti dužina sa displaya daljinomera odnose se na indeks prelamanja $(n_g - 1) \cdot 10^8 = 28451,4844$ (Edlen 1965), koji odgovara suvoj normalnoj atmosferi (15°C , 760 tora i 0,3% CO_2). Dužinu, koja se odnosi na stvarnu temperaturu, pritisak i vlagu dobijemo dodatnim računanjem.

Kao gruba ocena važi: promene temperature od 1°C , pritiska od 3hPa i pritiska vodene pare od 20 hPa, prouzrokuju promenu dužine od 1 mm/km. Kalibracijom upotrebljenih mernih instrumenata može se greška temperature ograničiti na $\pm 0,1^\circ\text{C}$, pritiska na 0,3 hPa, i vazdušne vlage na $\pm 5\%$ (približno 0,5 hPa pritiska vodene pare). Pri optimalnim atmosferskim uslovima iznosi greška meteorološke korekcije oko $\pm 0,2$ mm. S obzirom da se u većini slučajeva meteorološki podaci uzimaju samo na krajnjim tačkama merene dužine nije uvek moguća korektura merene dužine sa željenom tačnošću.

1.2 Merenje sa ME 5000

Kao što je već spomenuto, merenje dužina sa ME 5 000 zasniva se na merenju modulacionih frekvencija. Vrednosti frekvencija mere se uvek pri

istom faznom položaju povratnog signala. Određivnje celog broja talasnih dužina na merenom putu izvedeno je indirektno, promenom modulacione frekvencije u određenim razmacima. Najmanji frekventni razmak od 161,744 Hz odgovara promeni talasne dužine od približno 0,1 mm.

Preklopnikom »range« izaberemo merno područje. Područje »low range« (< 500 m) upotrebljavamo za merenje dužina od 10 m do 1000 m, a »high range« (> 500 m) za dužine pribl. od 50 m do 10 km. Optimalna granica za preklop je ca. 500 m. Stavljanjem funkcijskog preklopnika na položaj »measure«, u instrumentu se izvede unutrašnja kalibracija, kojom se odredi optimalno radno područje modulatora (početna modulaciona frekvencija). Pritiskom na tipku uključimo laser. Zatim sledi optičko i elektronsko viziranje. Ponovnim pritiskom na tipku počinje merenje. Instrument izmeri frekvenciju na tri nulta položaja i to na početku, sredini i na kraju područja modulatora. Računar izračuna dužinu i na ekranu se pokaže srednja vrednost iz tri merenja. Na kraju merenja laser se isključi. Vreme merenja iznosi oko 1,5 min. U »tracking« načinu merenja ponovi se merenje frekvencije samo jedne nulte tačke (u sredini područja), sa vremenskim razmakom od 10 sek.

2. KALIBRACIJA ME 5000

Rezultati istraživanja su pokazali da je unutrašnja tačnost instrumenta oko ± 0.02 mm, razlučivost ± 0.03 mm, a periodična greška ne prelazi 0.02 mm. Za merenje većih dužina najvažnija je, pored tačnosti određivanja meteoroloških uslova i termička stabilnost modulacione frekvencije-frekvencije synthesizera.

Od 10. do 15. aprila 1988. godine, na TU München, izvršena je kalibracija Mekometra ME 5000 (br. 357043) sa odseka za geodeziju FAGG Ljubljana. Za ispitivanja takve vrste potrebna je klima komora, koju je razvio Institut za geodeziju na TU München. Daljinomer je bio vođen preko spoljašnjeg računara.

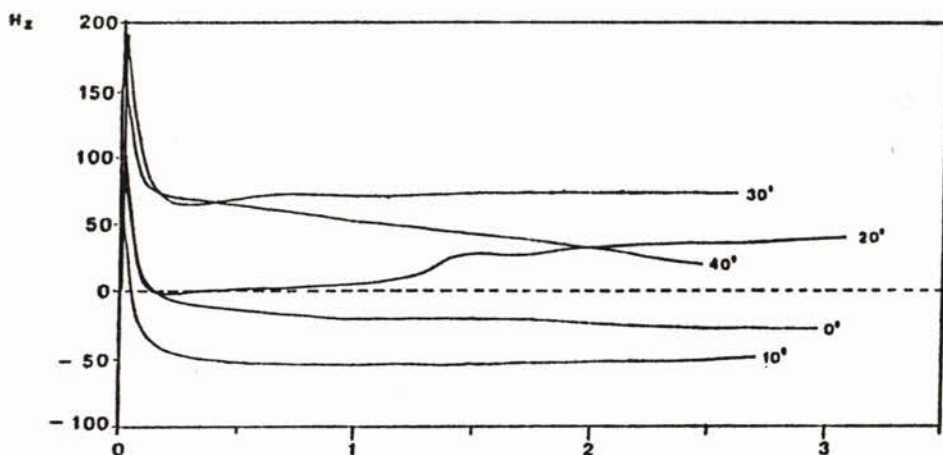
2.1 *Kratkovremenska stabilnost modulacione frekvencije*

Određena je stabilnost modulacione frekvencije od trenutka uključivanja instrumenta u intervalu od 40 minuta i to na pet različitih temperatura (u rasponu od 0°C do 40°C).

Sa slike se vidi, da prilikom uključivanja aklimatizovanog instrumenta modulaciona frekvencija naraste pri svim temperaturama (najveći skok 180 Hz pri 30°C), a zatim počne da pada. Posle tri minuta se umiri i u sledećih 40 minuta bitno ne menja svoju vrednost. Odstupanja od početne vrednosti se kreću od -50 Hz pri 10°C do +70 Hz pri 30°C.

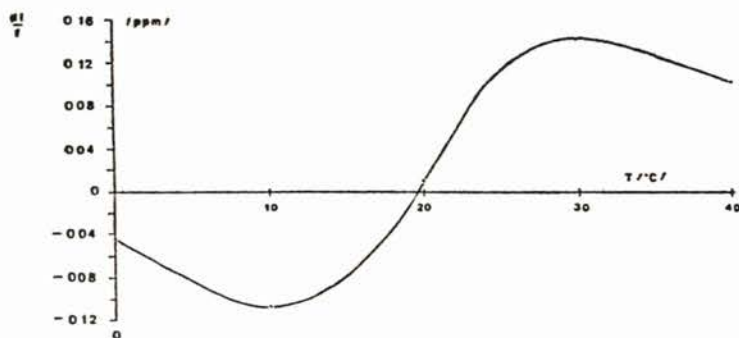
2.2 *Zavisnost merne frekvencije od temperature*

Merenje dužina sa ME 5000 traje od 3 do 5 minuta, kada instrument nije vođen sa računarnom. Tada je vreme merenja, naročito pri većim dužinama, još veće. Vrednosti frekvencija, pri različitim temperaturama, očitanih iz gornje tabele posle pet minuta od trenutka uključivanja instrumenta, bile su



Slika 2.1 Ponašanje synthesizera

osnova za određivanje krive, koja predstavlja zavisnost merne frekvencije od temperature. Sa slike se vidi da je maksimalna relativna greška 0.15 ppm, što je mnogo bolje od tolerancije koju daje proizvođač (0.3 ppm pri temperaturi od 0 do 40°C).



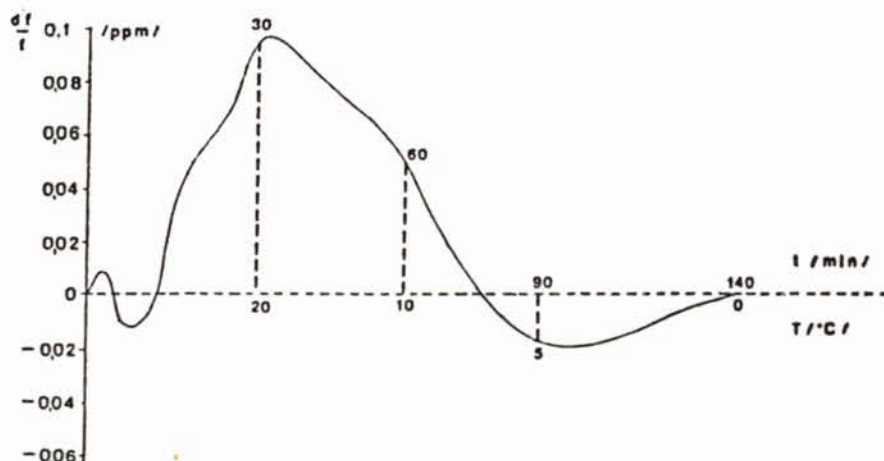
Slika 2.2 Zavisnost merne frekvencije od temperature

Zanimljiv je i tkz. aklimatizacioni efekat, koji određuje promenu merne frekvencije u odnosu na promenu temperature u određenom periodu. To je važno, pre svega, za određivanje časovnog intervala, koji je potreban za aklimatizaciju instrumenta.

Instrument je bio na početku ispitivanja zagrejan na 50°C, a zatim je temperatura u klima komori postepeno padala do 0°C. Slika 2.3 prikazuje prilagođavanje modulacione frekvencije na promenu temperature u okolini instrumenta.

Ispitivanje je pokazalo da se instrument veoma brzo odaziva temperaturnim promenama i zadržava frekvenciju u granicama od 0.1 ppm.

Završna ocena temperaturne stabilnosti bi bila da instrument ME 5000/357043 ima izuzetno veliku stabilnost frekvencije. Korekcija za vremensku nestabilnost frekvencije, za normalne temperaturne uslove, je minimalna i praktično je ne moramo uzimati u obzir.



Slika 2.3 Aklimatizacioni efekat

2.3 Dugovremenska stabilnost modulacione frekvencije

Dugovremenska stabilnost je u stvari starenje kristala kvarca. Proizvođači garantuju da je promena manja od 0.5 ppm godišnje. Modulacionu frekvenciju je zbog toga potrebno periodično kontrolisati. Ako imamo dovoljno tačan frekvencometar, kontrola frekvencije kod Mekometra ME 5000 je veoma jednostavna.

2.4 Ispitivanje razmere i adicione konstante

Teoretski modulaciona frekvencija određuje razmeru merenja dužina. To smo želeli praktično dokazati merenjem na komparatorskoj bazi. Istovremeno je moguće odrediti i adicijonu konstantu.

Merenja su obavljena na komparatorskoj bazi Ebersberger Forst u okolini Münchena. Upotrebljeni su reflektori sa poznatim adicijonim konstantama. Meteorološki uslovi određeni su na oba kraja merene dužine sa preciznim psihrometrom i barometrom. Dužine su izmerene obostrano. Rezultati merenja se nalaze u tabeli 1.

Tabela 1. Merenje dužina sa Mekometrom ME 5000/357043 na komparatorskoj bazi Ebersberger Forst München (maj 89)

od — do	dužina strane m	izmerena dužina m	razlika mm
8 — 18	432.03192	432.03218	— 0.26
18 — 36	432.03320	432.03328	— 0.08
0 — 36	864.06513	864.06519	— 0.06

3. MOGUĆNOSTI UPOTREBE MEKOMETRA ME 5000

Povećanje dometa merenja sa upotrebom računara i visoka unutrašnja tačnost instrumenta daju mogućnosti upotrebe daljinomera za merenje pri najtačnijim radovima u inženjerskoj geodeziji, pre svega za merenje u preciznim prostornim mrežama kao na primer: bazne mreže, mreže za određivanja pomeranja objekata, mreže za određivanje tektonskih pomeranja itd.

Napominjem da je instrument u svetu upotrebljen u mnogim zadacima kao na primer: određivanje elemenata baznih mreža (National Geodetic Baseline Ottawa, Ebersberger Forst . . .), za ispitivanje akceleratora (HERA, PETRA, DESY). Postignuti su odlični rezultati.

Takođe je i kod nas instrument dobro ispitano. Izvršena su merenja na komparatorskoj bazi u Zagrebu, bazi GZ SRS, u mikro mrežama Ljubljane za određivanje tektonskih pomeranja, u mreži odlagališta jalovine rudnika Žirovski vrh za određivanje sleganja. Sve to je potvrdilo izuzetan kvalitet instrumenta, njegovu praktičnost i visoku tačnost. Povezivanje instrumenta sa spoljnim računarom ta svojstva još povećavaju.

LITERATURA:

- [1] Bolšakov, Deumlich, Golubev, Vasilev: Elektronische Streckenmessung; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin Verlag Nedra, Moskau 1985.
- [2] Deumlich, F.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1988.
- [3] Kogoj, D: Analiza pozicijske natančnosti določitve horizontalnih premikova u mikro mrežama Ljubljane; Magistrsko delo, Ljubljana 1989.
- [4] Maurer, W., Schrimmer, W., Schwarz, W.: Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten des Mekometer ME 5000; X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung München 12.—17. Sept. 1988.
- [5] Meier, D., Löser, R.: Das Mekometer ME 5000 — ein neuer Präzisionsdistanzmesser; Kern and Co. AG Aarau.
- [6] * * *: Bedingungsanleitung Präzisionsdistanzmesser Mekometer ME 5000.

SAŽETAK

Daljinomer Kern Mekometer ME 5000 jedan je od najpreciznijih elektrooptičkih faznih daljinomera. Velika unutrašnja tačnost instrumenta posledica je upotrebe vrhunske elektronike i odličnih rešenja. Ovaj rad opisuje princip rada instrumenta i način kontrole njegove tačnosti — kalibriranje instrumenta br. 357043.

ZUSAMENFASSUNG

Das Distanzmesser Kern Mekometer ME 5000 ist ein der genauesten elektrooptischen Distanzmessern. Hohe innere Messgenauigkeit wurde durch die Verwendung der besten Elektronik und der ausgezeichneten Lösungen erreicht. In dieser Arbeit wurde die Funktionsweise und die Kalibrierung des Mekometers ME 5000 beschrieben.

Primljeno: 1989-10-01