

# NOVOSTI V MERSKEM INSTRUMENTARIJU - TEODOLITIH

Florijan Vodopivec  
dr.teh.znanosti

FAGG Oddelek za geodezijo  
61000 Ljubljana, YU

## IZVLEČEK

*Prikazani so različni načini avtomatskega čitanja na elektronskih teodolitih - kodirani in inkrementalni način.*

## ABSTRACT

*Various of the automatical scanning on the electronical theodolites are represented - the code and the incremental methods of the scanning.*

Avtomacija prodira čedalje bolj v vsó človekovo dejavnost. Avtomati izpodrivajo do sedaj kronostvarstva - človeka, zaradi njegove zmotljivosti. Avtomati bodo slej ko prej zamenjali skoraj vse delo človeka, njemu bo ostal le nadzor nad delom avtomatov.

Poglejmo poslednje dosežke na področju merskega instrumentarija, ki se ali pa se še bo uporabljal pri geodetskem merjenju. Instrumente glede na izvedbo in glede na namen razdelimo na:

- kotomerne instrumente - teodolite
- instrumente za merjenje razdalj - razdaljemere
- instrumente za merjenje višinskih razlik - nivelirje
- instrumente za satelitsko geodezijo
- instrumente za inercialno geodezijo

## TEODOLITI

Oglejmo si kratek zgodovinski razvoj in današnje stanje. Leta 1615 je kot prvi meril trigonometrično mrežo Snellius s četrtino

lesenega kroga z radijem 8,5 m. Od takrat se instrumenti za merjenje kotov neprestano izboljšujejo. Vendar ta razvoj ni linearen ampak skokovit. Vsaka nova iznajdba predstavlja tak skok kot sledi:

- celokrožna razdelba z dioptrjem
- uvedba daljnogleda
- uvedba nonija
- stekleni krogi, mikrometri, optična grezila
- kompenzatorji
- digitalno čitanje na klasičnih krogih
- elektronsko čitanje
- avtomatizirana registracija

V tem trenutku nas seveda zanima predvsem elektronski teodolit z avtomatskim registriranjem.

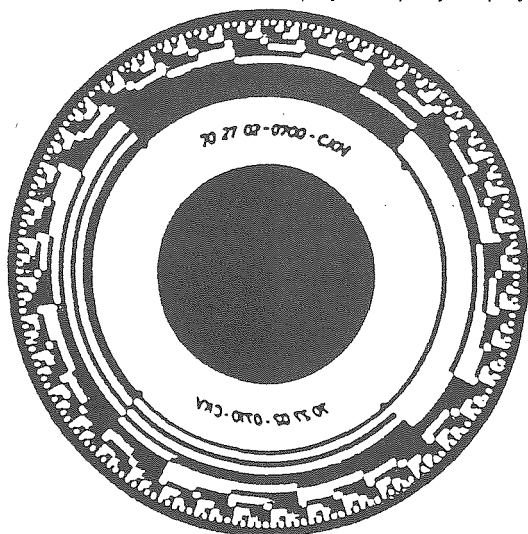
Avtomatizacija čitanja na teodolitih je že zelo stara želja vseh uporabnikov. Prvi poizkusi so bili na mehanični podlagi z zobatimi kolesi in mehaničnimi števci. Vsakemu je jasno, da s takim teodolitom ni mogoče doseči niti približno tako zaželjene

sekundne natančnosti. Šele z razvojem elektronike in njenim prodorom v izdelavo teodolitov se je pojavila možnost dejanske avtomatizacije čitanja z željeno natančnostjo. Pri avtomatizaciji ločimo dva načina avtomatskega čitanja na krogih:

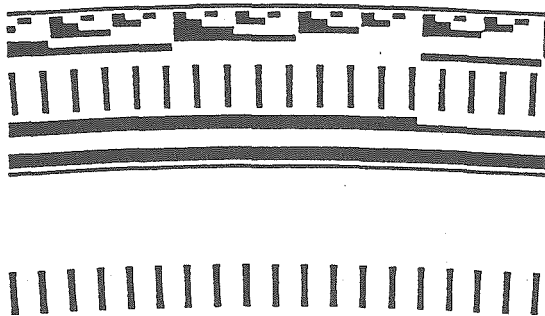
- kodirani način čitanja
- inkrementalni način čitanja

Kot prvi se je pojavil način čitanja, ko imamo namesto črtne razdelbe na krogih posebno kodirano razdelbo na podlagi katere nato računalnik določa odčitek pri določeni vizuri.

Na sliki 1 je prikazan način kode na krogu tovarne Zeiss Oberkochen in sicer na sliki 1a je prikazan celoten krog Reg Elta 14 in na sliki 1b povečan izsek razdelbe pri teodolitu Elta 2. Torej vidimo, da nimamo več samo črtne razdelbe kot pri klasičnih teodolitih ampak poleg črtne razdelbe še dodatne kode, kar nam omogoča s pomočjo elektronike določitev odčitka na krogu. Na sliki 2a vidimo detajl štirih svetlobnih diod, ki dajejo svetlobo, ta pa na mestih, ki so neobarvana presvetli krog in pade na ustrezno fotodiodo. Ta svetlobo sprejme in pošlje naprej signal na podlagi

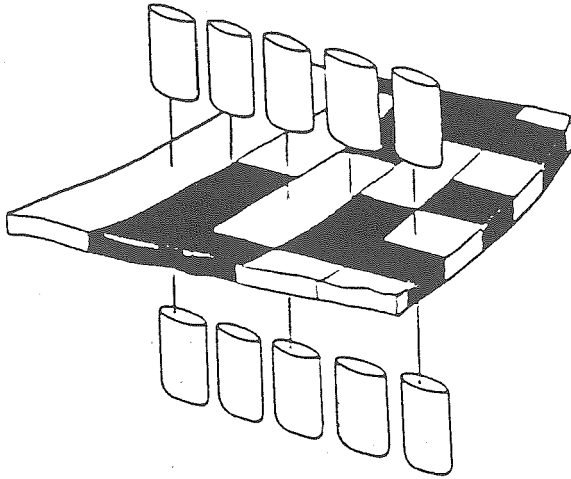


Slika 1a



Slika 1b

katerega nato računalnik računa grobi odčitek.

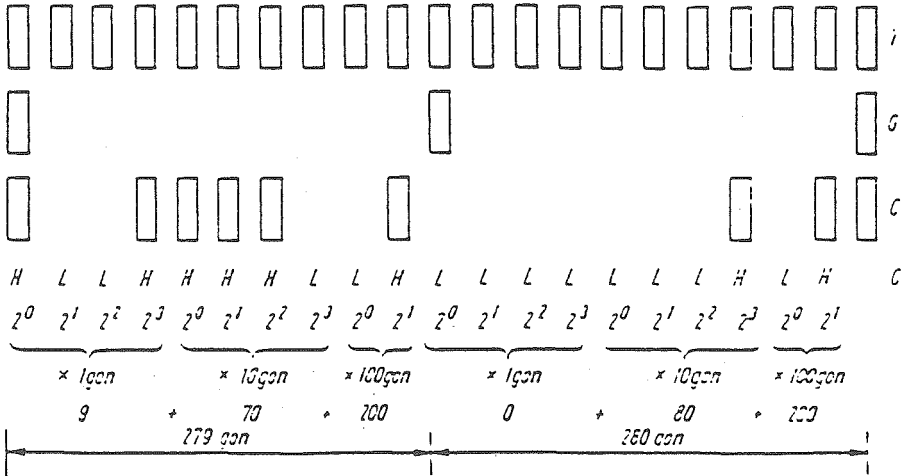


Slika 2a

Na sliki 2b pa je prikazan način grobega odčitka na podlagi svetlobno - električnih impulzov skozi kodirano linijo C. Seveda temu grobem odčitku sledi še fini odčitek, ki ga namesto nas opravi elektronika s pomočjo interpolacije.

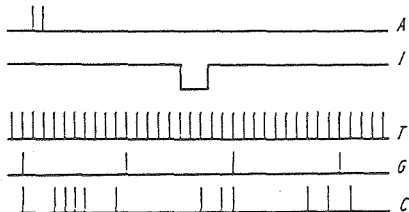
Interpolacija je prikazana na sliki 3a, kjer vidimo pet krožnih linij. G linija predstavlja gonjsko razdelitev s 400 črticami.

Kodirana linija C služi za določitev grobega odčitka števila celih gonov. 0,1 gona dobimo kot razliko števila črtic na liniji T (4000 črtic), med gonjsko črtico na liniji G in

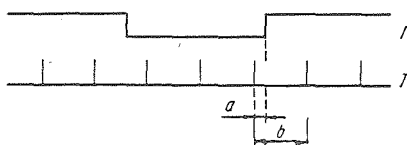


Slika 2b

indeksom na liniji I. Število tako dobljenih 0,1 gonov prištejemo številu celih gonov. Da natančnost še povečamo, moramo določiti še fini odčitek.



Slika 3a



Slika 3b

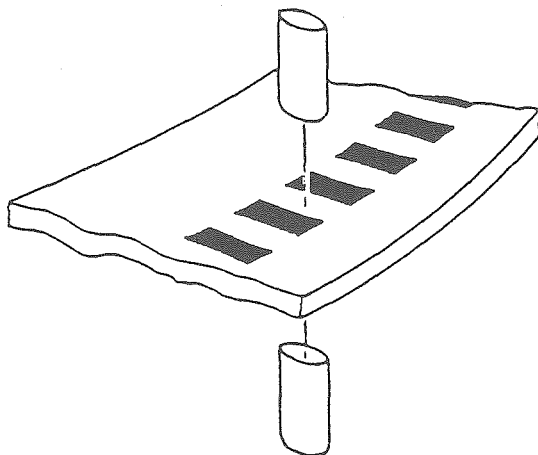
Na sliki 3b vidimo, da moramo še določiti preostanka "a", to je razlike med zadnjo še odčitano črtico na kodirani liniji T in koncem impulza na kodirani liniji I. Število "a" določimo s pomočjo interpolacije, števila impulzov na prej omenjenem intervalu in številom impulzov celega intervala med črticami kodirane linije T.

Na ta način smo dobili celotni odčitek pri dani vizuri, ki ga zapišemo ali pa avtomatsko shranimo v pomnilnik.

Inkrementalni način avtomatskega čitanja

Na sliki 4a je prikazan način razdelbe na krogu pri inkrementalnem načinu čitanja. Vidimo, da imamo samo eno razdelbo. Ta pa ni črna, kot pri klasičnih teodolitih, ampak so širine črtic enake širini vmesnih polj.

Celoten krog je običajno razdeljen na 20.000 temnih in 20.000 enako širokih svetlih polj. Skupaj torej 40.000. Izračunano v gonih nam vsak element razdelbe predstavlja 0,01 gona. Kot vidimo krog ni oštevilčen, zato ne moremo določati absolutnih leg smeri ampak le relativne lege smeri glede na število pretečenih svetlo-temnih polj. To določamo s pomočjo skaniranja. Fotodiode dobivajo od luminiscenčnih diod različno količino svetlobe, ki zavisi od razporeditve svetlo-temnih polj med obema diodama.

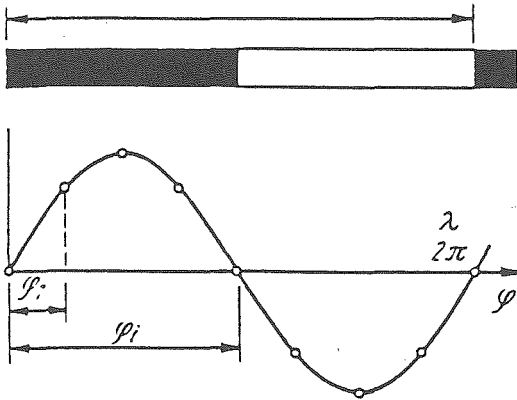


Grobi odčitek gonov (kodirana linija C)	28 0 0	gon
Grobi odčitek 0,1 gonov (kodirani liniji T, I in G)	0 7	gon
Fini odčitek a/b (kodirani liniji I in T)	0 0250	gon

slika 4a

---

280.7250 gon



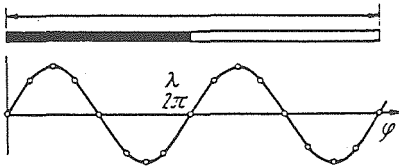
Slika 4b

Iz slike 4b vidimo, da se jakost svetlobnega toka menja sinusoidno. Fotodioda svetlobni tok spreminja v električnega, tega pa s posebnim elektronskim dodatkom v pravokotne signale. Poseben detektor zaznava smer vrtenja alhidade in daje navodilo števcu za pravilno registriranje vrtenja alhidade.

Da bi dobili točnejše čitanje, se poslužujemo dveh načinov:

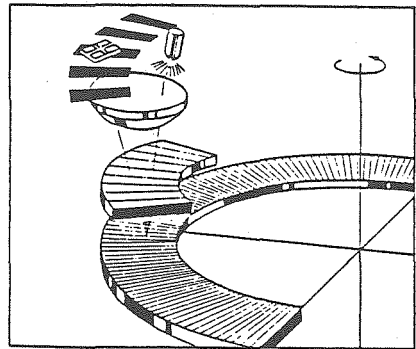
- interpolacije (v okviru svetlo-temnih polj)
- dinamičnega čitanja

Če želimo točnejši način čitanja kot je 0,01 gona, potem se moramo poslužiti interpolacije. Tu določimo interpolacijo manjše in večje natančnosti. Pri manjši natančnosti interpolacije v okviru enega svetlo-temnega polja, kar odgovarja periodi  $2\pi$ , s pomočjo elektronske interpolacije lahko razložimo osem faz (slika 4b). Tako povečamo natančnost čitanja pri 25.000 črticah na 0,002 gona. Še natančnejši način je podan na sliki 5a, kjer celotno svetlo-temno polje preslikamo na 2 periodi, to je na  $4\pi$  in s tem dosežemo interpolacijo v razmerju 1:16.



Slika 5a

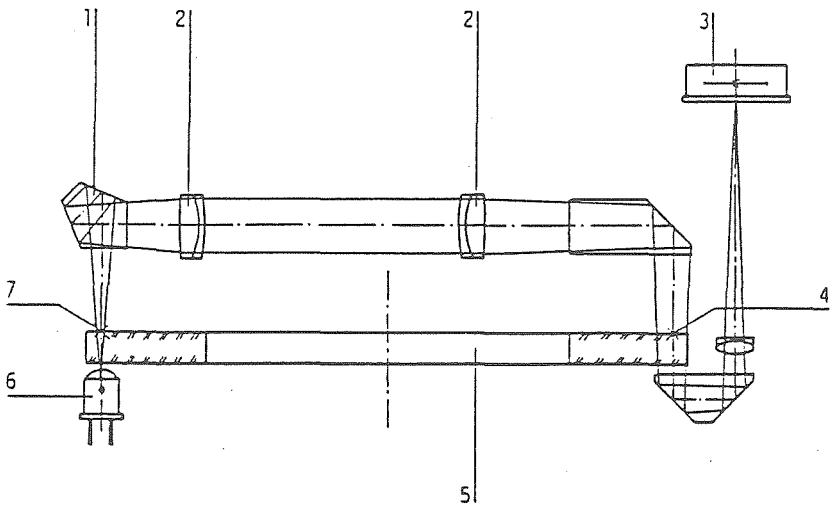
Pri 25.000 črticah je to 0,001 gona. Natančnost pa lahko še povečamo, če združimo obe diametralni legi razdelbe eno nad drugo in če uporabimo preslikavo enega svetlo-temnega polja na  $4\pi$ , se nam natančnost še poveča na 0,0005 gona. Na ta način smo še eliminirali pogrešek ekscentričnosti razdelbe (slika 5b).



Slika 5b

Natančnejši način interpolacije seveda zahteva istočasno opazovanje obeh diametralnih leg razdelbe, da eliminiramo ekscentričnost razdelbe in povečamo natančnost interpolacije. Sam princip čitanja si oglejmo na primeru elektronskega teodolita tovarne Kern E 2.

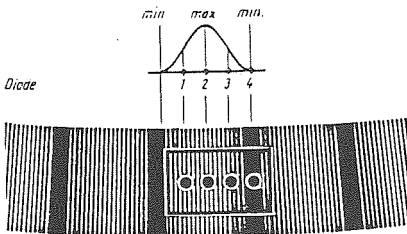
Elektronski teodolit E 2 uporablja inkrementalno tehniko določanja odčitka na horizontalnem in vertikalnem krogu. Namesto običajnega limba za merjenje kotov uporablja krog z nizom črtic (rež temnih in svetlih polj) na enakih razmakih. Osnovna naloga elektronike je določanje smeri in števila prehodov temnih in svetlih polj ob zasuku horizontalnega ali vertikalnega kroga teodolita.



Slika 6

Za doseg čim večje točnosti odčitavanja velikosti premika je pri teodolitu E 2 koristno uporabljen Moire efekt, ki omogoča izredno točno interpolacijo med dvema črticama.

Svetloba luminiscenčne diode (6) (slika 6) prehaja skozi določeno mesto (samo 7) na steklenem krogu (5), na katerem se nahajajo radialne črtice širine  $5,5\mu\text{m}$  (na celotnem krogu 20.000 črtic). Razmik med črticami je enak širini črtice. Svetloba prehaja najprej skozi optični sistem leč (2), ki ustvarja povečano sliko prvega dela steklenega kroga (faktor povečave je 1,005) v ravnino diametralnega dela steklenega kroga (4). Na tej drugi strani zaradi neenake širine radialnih črtic tega dela kroga in radialnih črtic slike prvega dela kroga prihaja do medsebojnega periodičnega prekrivanja (slika 7). Na osnovi tega prekrivanja nastajajo Moire-jeve slike, ki delujejo podobno kot nonij in s pomočjo katerih je možna natančna interpolacija premika (rotacije) alhidade znotraj širine radialne črtice.



Slika 7

Moire-jeva slika (sestavlja jo 200 radialnih črtic) se preslika na 4 fotodiode (3) (slika 6). Jakost svetlobnega toka, ki prehaja skozi Moire-jeve slike ima približno sinusoidno porazdelitev. Fotodiode, ki so razporejene vzdolž Moire-jeve slike, pretvarjajo svetlobni tok, ki pada na njih v električno napetost, s pomočjo katere se izvrši grobo merjenje - določitev števila prehodov Moire-jevih slik in fino merjenje, ki je v bistvu matematična interpolacija - določitev lege znotraj Moire-jeve slike. Pri zasuku teodolita diode generirajo štiri električne signale, ki so med seboj zamaknjeni za 90 stopinj.

Svetlobni tok na teh diodah lahko zapišemo

$$U_1 = \bar{U}_1 \sin \varphi$$

$$U_2 = \bar{U}_2 \sin (\varphi + \pi/2)$$

$$U_3 = \bar{U}_3 \sin (\varphi + \pi)$$

$$U_4 = \bar{U}_4 \sin (\varphi + 3\pi/2)$$

Za fino čitanje moramo določiti lego diod v okviru Moire-jeve diode, s pomočjo naslednjega izrednotenja danih signalov na vseh štirih diodah.

$$U_1 - U_3 = \bar{U}_1 \sin \varphi - \bar{U}_3 \sin (\varphi + \pi) = (\bar{U}_1 + \bar{U}_3) \sin \varphi$$

$$U_2 - U_4 = \bar{U}_2 \sin (\varphi + \pi/2) - \bar{U}_4 \sin (\varphi + 3\pi/2) = (\bar{U}_2 + \bar{U}_4) \cos \varphi$$

Amplituda je uravnavana tako, da velja

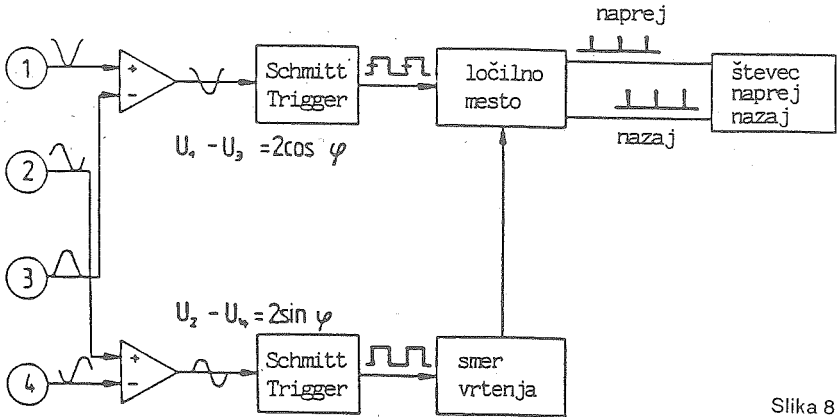
$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4.$$

Fazni kot pa nam izračuna mikroprocesor po enačbi:

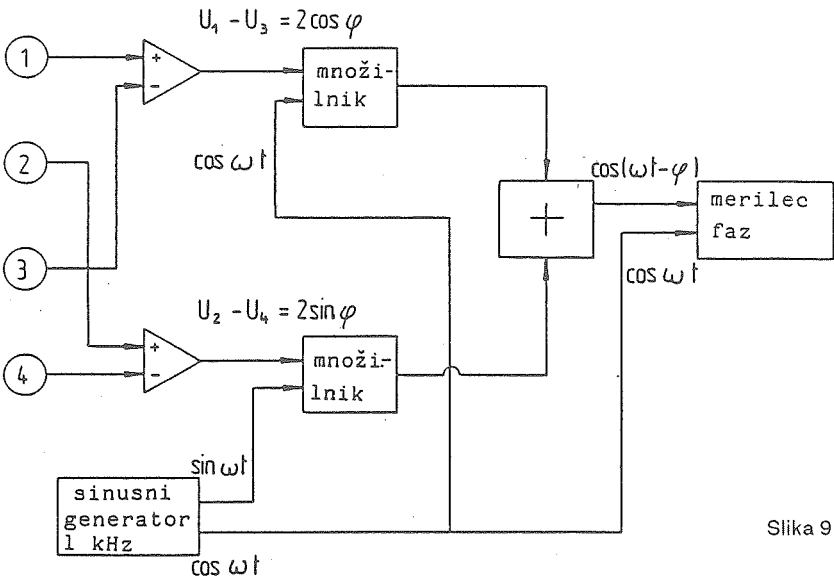
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(\bar{U}_1 + \bar{U}_3) \sin \varphi}{(\bar{U}_2 + \bar{U}_4) \cos \varphi}$$

Kako je to pri teodolitu E 2 tehnično izvedeno vidimo na sliki 8.

Signal iz fotodiod prehaja na operative ojačevalce. Pri premiku za eno Moire-jevo periodo se razlika napetosti  $U_1 - U_3$  menja kot sinusna funkcija vrtenja alhidade, razlika napetosti  $U_2 - U_4$  pa kot kosinusna funkcija. Schmitt-ovi stikali (Schmitt Trigger) funkcija.



Slika 8



Slika 9

pretvorita ti razliki napetosti v pravokotna signala, ki sta zamaknjena za  $\pi/2$ . Detektor zamika na osnovi primerjave obeh signalov (zakasnitev faze - odvisno od smeri zasuka) pošilja impulze preko kanala naprej - nazaj na mikroracionalnik (ena Moire-jeva slika - en pravokotni signal - en impulz) - grobo čitanje.

Fino merjenje predstavlja interpolacije, s katero se določa premik znotraj Moire-jeve slike. Da bi dobili čitanje z natančnostjo 0,0001 gona, moramo števeni interval interpolirati z natančnostjo enega procenta.

Če je grobo čitanje dinamično, potem je fino čitanje statično. Rezultat tega je kot  $\alpha$ , ki ga dobimo s pomočjo merjenja svetlobe na 4 diodah. Dva diferenčna signala ( $U_1 - U_3$  in  $U_2 - U_4$ ) množimo s harmoničnim nihanjem s frekvenco 1 kHz. Oba tako dobljena signala sta v fazi zamaknjena za  $\pi/2$ , relativno drug na drugega.

Ta dva signala združimo in tako lahko računamo  $\cos(\alpha - \varphi)$  po sledeči enačbi:

$$\cos(\alpha - \varphi) = \cos\alpha \cdot \cos\varphi + \sin\alpha \cdot \sin\varphi$$

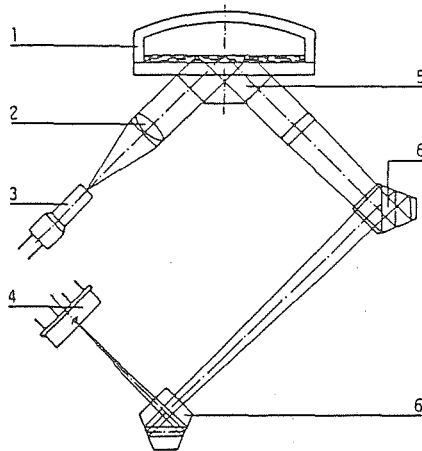
To nato primerjamo z začetnim nihanjem enega kHz in oba signala imata fazni premik

ravno za vrednost  $\alpha$ . Shematični prikaz finega merjenja je prikazan na sliki 9. To vrednost kota računalnik pretvori v digitalno obliko in nato sešteje grobi in fini odčitek, ki se nato pojavi na ekranu.

Pri inkrementalni tehniki ničla na krogu ni fiksna. Določa se ob vsaki vključitvi elektronskega teodolita posebej, tedaj se začetni odčitek postavi na ničlo. Od trenutnega položaja alhidade ob vključitvi je odvisna ničla na horizontalnem krogu.

Vertikalni krog mora biti vedno tako orientiran, da se ničla razdelbe nahaja v smeri zenita. To je pri elektronskem teodolitu E 2 doseženo z ob vertikalni krog vgrajeno fiksno masko z nizom rež in drugo enako masko, ki se giblje skupaj z vertikalnim krogom. V trenutku prehoda daljnogleda skozi vertikalni položaj se prekrijeta fiksna in gibljiva maska, svetloba luminiscenčne diode prehaja skozi reže in pada na fotodiodo. Na osnovi svetlobnega impulza na fotodiodi le-ta sproži merjenje.

Shematični prikaz delovanja kompenzatorja elektronskega teodolita E 2 je prikazan na sliki 10. Podobno kot klasični teodolit DKM



Slika 10

- 1 tekočinski kompenzator
- 2 sistem leč

- 3 luminiscenčna dioda
- 4 fotodetektor
- 5 odbit snop svetlobe
- 6 optične prizme



2 A ima tudi elektronski teodolit E 2 tekočinski kompenzator.

Luminiscenčna dioda oddaja snop svetlobe, ki se na zgornji površini tekočine odbije (totalni odboj) in pade na fotodiodo, katere površina deluje kot ploskovni fotodetektor. Če pade svetloba na aktivno površino fotodiode, se na elektrodah, ki so ob straneh, pojavi napetost, ki je obratno proporcionalna oddaljenosti osvetljene točke od elektrod. Na osnovi napetosti na posamezni elektrodi je mogoče določiti položaj (koordinate) glede na izhodiščno točko kompenzatorja, s tem pa nagib teodolita v dveh med seboj pravokotnih smereh. Natančnost odčitavanja teh koordinat je večja od 1 m (kar odgovarja 0,1 mgon). Podatke o nagibu vertikalne osi

predstavlja stalno mesto  $L_r$  pa gibljivo mesto povezano z daljnogledom teodolita.

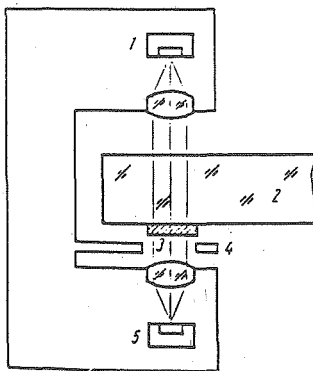
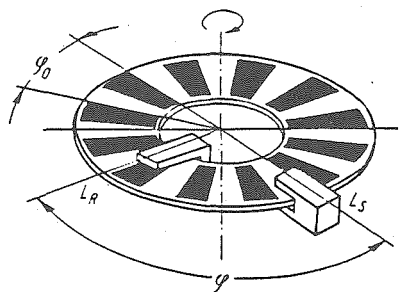
Če predstavlja svetlo/temno polje kot in ostanek čitanja, potem lahko zapišemo izmerjeni kot v obliki:

$$\psi = n\psi_0 + \Delta\psi \text{ ali } T = nT_0 + \Delta T$$

Število  $n$  predstavlja število sinusnih signalov svetlo/temnih polj, ki jih števec prečita. Te iste sinusne signale pretvorimo v pravokotne signale in sicer za stalno mesto  $L_s$  in za premično mesto  $L_r$ .

Razlika dobljenih pravokotnih signalov pa je prav ostanek odčika.

Postopek čitanja pa je sledeč. Poseben procesor sproži vrtenje kroga. S tem se



Slika 11

teodolita lahko odčitamo na ekranu ali pa mikroročunalnik z njimi direktno popravi odčitke na krogih.

#### Dinamični način točnejšega čitanja

Ta način uporablja Wild v teodolitu T 2000, kjer primerja fazi (svetlo/temne periode) na dveh mestih čitanja. Na sliki 11 vidimo dva sistema za čitanje na inkrementalnem krogu. V obeh primerih imamo diametralno postavljene odčitni mesti za eliminacijo pogreška ekscentričnosti razdelbe.  $L_s$

sproži potek čitanja prehoda celih faz, torej števila  $n$ . Celoten krog vsebuje 1024 črtic. Pri vrtenju takovsako odvzemno mesto opravi 512 faznih primerjav, iz katerih računalnik izračuna povprečje in tvori aritmetično sredino dveh diametralnih leg, tako dobimo prost pogreška ekscentritete razdelbe. Pri teodolitu Wild T 2000 tako dobimo odčitek z natančnostjo 0,01 mgona.

Seveda pa so s tem opisani samo osnovni načini čitanja, ostanejo pa nam še mnogi pod sistemi različnih proizvajalcev.