

UDK 528.024.1/4:65.011.56
Pregledni članak

AUTOMATIZACIJA MJERENJA VISINSKIH RAZLIKA I ODREĐIVANJE VISINA TOČAKA

Dušan BENČIĆ, Zlatko LASIĆ — Zagreb*

SAŽETAK: U ovom radu prikazan je razvoj automatizacije mjerenja visinskih razlika i određivanja visina točaka, posebno u trigonometrijskom i geometrijskom nivelmanu. Naročito su istaknuti problemi automatizacije geometrijskog nivelmana i najnovija rješenja za potpunu automatizaciju.

UVOD

Razvoj automatizacije mjernih procesa, zapčet već u ranijem razdoblju, doživljava u drugoj polovini ovog stoljeća izuzetno dinamičan tok, posebno pojavom elektroničkih instrumenata uz primjenu mikroprocesora. Razvoj automatiziranih postupaka potpomognutih računalom doveo je do znatnog povećanja produktivnosti, ali i do redukcije subjektivnog faktora u procesu mjerenja. Tehnički razvoj u posljednja dva desetljeća u području instrumenata za mjerenje kutova i duljina donio je potpuno nove ili značajno promijenjene konstrukcije. Spomenimo samo razvoj područja elektroničkog mjerenja duljina, elektroničkih teodolita s digitalnim očitavanjem odnosno registracijom, sve do pojave videoteodolita s automatskim viziranjem u najnovije vrijeme. Nadalje, razvijeni su potpuno novi mjerni postupci i sistemi, kao npr. inercijalni sistemi, te GPS sistemi, koji se primjenjuju za određivanje pozicije točaka na površni Zemlje pomoću električnih signala umjetnih Zemljinih satelita, kojih se stupanj automatizacije jedva i može prijeći (Caspary 1988). Takav neslućeni razvoj, koji neprekidno traje, uzrokovat će još i u ovom stoljeću fundamentalne izmjene u načinu planiranja, projektiranja i provedbe geodetskih radova uz vrlo visok stupanj automatizacije, kao i u aktivnostima geodetskog stručnjaka u struci a i u odnosu na srodne struke i znanosti. U takvom revolucionarnom razvoju razvija se nova industrija hardvera i softvera mjernih sistema, poširuju se zadaci i stvara novi image geodetske struke kao informatičke profesije sa širokim spektrom prezentacije relevantnih podataka u grafičkom, numeričkom i tekstualnom obliku.

Uz takve fundamentalne primjene, u kojima se obnavlja i mijenja čitava zgrada struke, teško je predvidjeti detaljniju primjenu tradicionalnih instrumenata u novim tokovima mjernih procesa u daljnjih deset godina, tj. do

* Prof. dr. Dušan Benčić, mr. Zlatko Lasić, Geodetski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26.

kraja ovog stoljeća, no sigurno je da će oni biti primijenjeni integrativno s novim tehnologijama.

U takvom svjetlu treba promatrati i razvoj i primjenu užeg područja geodetske mjerne tehnike i sistema kao što su mjerenja visinskih razlika i određivanja visina točaka u odnosu na referentnu plohu.

Postupci za određivanje visine točaka različiti su ovisno o zadacima, svrsi i traženoj točnosti. Pri *kontinuiranom postupku*, npr. primjenom inercijalnih sistema INS (Inertial Navigation System) visine točaka određuju se praktički neprekinuto, dobivamo visinski profil prijednog puta. Za određivanje visina većinom se mjeri akceleracija u vertikalnom smjeru uz dvostruku vremensku integraciju. Standardna devijacija određivanja visine iznosi ± 5 do 10 cm (Caspary 1988). Taj se postupak ističe brzinom mjerenja i potpunom automatizacijom mjernog procesa, no kako vidimo, ograničene je točnosti. Kako se primjenom INS mogu istovremeno mjeriti i druge geodetske relevantne veličine, kao što su koordinatne razlike, otklon vertikale, azimut to će ova nova tehnologija imati primjenu u specijalne svrhe, posebno kao dopuna u primjeni GPS-sistema (Gorten 1988).

Direktnim postupkom određuje se visinska razlika na osnovi jednog viziranja, a mjereni elementi su zenitna daljina i duljina izmjerena do točke (npr. trigonometrijsko mjerenje visinskih razlika). Direktnim postupkom određuju se i pozicije točaka na Zemlji na osnovi prijema električnih signala umjetnih satelita. No za geodetske svrhe (gdje se traži cm-točnost) primjenjuje se diferencijalna metoda uz istovremeno opažanje na dvije ili više točaka. Mjerni tok i obrada podataka pritom su potpuno automatizirani. Upravo tehnologija primjene GPS-a, koja će biti potpuno operativna od 1992. godine, unijet će značajne promjene u projektiranju geodetskih mreža i izvođenju geodetskih radova. Računa se da će krajem stoljeća u svijetu biti u praktičnoj primjeni preko 200 000 GPS-prijemnika. Istaknimo da se kako primjenom INS-GPS-uređaja, tako i trigonometrijskim mjerenjima uz obračun utjecaja otklona vertikale dobivaju obične elipsoidne visine.

Apsolutnim postupkom određuju se visine točaka potpuno neovisno, no točnost određivanja je mala. Tu se mogu ubrojiti barometrijsko mjerenje visina, kao i primjena već spomenutog GPS-a. I barometrijsko mjerenje visina moguće je u znatnoj mjeri automatizirati.

Najveće točnosti u određivanju visina točaka u sadašnjem trenutku postižu se *inkrementalnim postupkom*, kojim se visinska razlika točaka u nivelmanskim vlakovima određuje kao zbroj pojedinačnih visinskih razlika. Pri tome razlikujemo geometrijski i trigonometrijski nivelman. Ove metode spadaju u klasične načine izmjere pri realizaciji nivelmanskih mreža, kako u osnovnim geodetskim radovima, tako i u inženjerskoj geodeziji. Upravo zbog značajne dosadašnje primjene tih postupaka, kao i zbog aktualnosti u budućoj primjeni uz integraciju s novim tehnologijama, u ovom ćemo radu iznijeti mogućnosti suvremenog razvoja automatizacije tih metoda, budući da se pri inkrementalnom postupku radi o mjerenjima koja su relativno dugotrajna i značajno ovisna o utjecaju atmosfere refrakcije, kao i o ulozi opažanja, a automatizacija je naišla na niz problema, pa u određenoj mjeri i kasni u odnosu na mjerenje kutova i duljina.

Automatizacija mjerenja inkrementalnim postupkom dosada se značajnije razvila u području trigonometrijskog mjerenja visinskih razlika. Razlog tome je što se pri trigonometrijskom nivelmanu mjere vertikalni kutovi i duljine, pa

je razvoj automatizacije u teodolita i elektroničkih daljinomjera, a po tome i elektroničkih tahimetara, uvjetovala i razvoj automatizacije tog nivelmana. Posebno je za automatizaciju značajna pojava elektroničkih teodolita s mikroprocesorima. Slijedi je i razvoj elektroničkih tahimetara s automatskom registracijom podataka, koji postaju univerzalni instrumenti tzv. totalne mjerne stanice (»total station«) uz realizaciju direktnog automatskog kontinuiranog toka podataka, od registracije podataka do konačnog rezultata. Na taj način bila je prvi put ostvarena i automatizacija nivelmana (Scherer 1988). Spomenimo da je u toku posljednjeg desetljeća došlo do razvoja tzv. druge generacije elektroničkih tahimetara u kojih su neke instrumentalne pogreške korigirane primjenom odgovarajućeg softvera, što je omogućilo jednostavniju mehaničku konstrukciju, a time i povećanu stabilnost instrumenta, pa su i utjecaji nekorigiranih instrumentalnih pogrešaka manji. Uz to ugradnjom dvoosnih kompenzatora automatski se korigiraju utjecaji pogreške vertikalne osi tahimetra. Razvojem dinamičkih teodolita s automatskim viziranjem točke, tzv. videoteodolita (npr. KERN E-2-SE; WILD TM 3000V) s ugrađenom CCD-kamerom i matricom dioda za digitalni prijem slike, kao i motornim pogonom za kretanje oko karakterističnih osi i automatsko izoštravanje slike, pojavljuje se i treća generacija elektroničkih tahimetara — videotahimetara uz vrlo visok stupanj automatizacije.

Za određivanje prostorne pozicije točke, dakle, i relativnih visina točaka u inženjerskoj geodeziji, posebno u primjeni u strojarstvu za određivanje i kontroli oblika i pomaka, realizirani su mjerni sistemi s primjenom elektroničkih teodolita (npr. KERN ECDS2, WILD TMS), o čemu je već posebno pisano u Geodetskom listu (Benčić, Lasić 1987). Karakteristično je pri tim mjerenjima da se pozicija točaka određuje na osnovi mjerenja kutova. Time su izbjegnuta mjerenja duljina elektroničkim daljinomjerima, koji na vrlo kratkim udaljenostima ne daju dovoljnu točnost. Primjenom videoteodolita ovaj je postupak danas potpuno automatiziran — od automatskog zakretanja oko osi teodolita, automatskog izoštravanja i viziranja do automatske registracije mjernih podataka i prikaza rezultata na monitoru. Čitav sistem upravlja se računalom, a istodobno u mjerenje može biti uključeno nekoliko teodolita.

AUTOMATIZACIJA TRIGONOMETRIJSKOG NIVELMANA

U trigonometrijskom nivelmanu primjenom elektroničkog tahimetra na cilju je prizma i vizurna značka. Udaljenost za viziranje je povećana, a mjerenje uz nagnuti durbin može omogućiti povoljniji prolaz vizure kroz zračne slojeve i veći doseg no u geometrijskom nivelmanu. Posebno je povoljna primjena trigonometrijskog nivelmana u brdovitim predjelima, te u inženjerskoj geodeziji (npr. na branama), gdje će automatizacija postupka povećati ekonomičnost radova. S tom namjenom vršena su brojna ispitivanja optimiranjem mjernog postupka u svrhu povećanja brzine izvedbe trigonometrijskog nivelmana, kao i povećanja njegove točnosti (Kratsch 1978, Rüeger, Brunner 1982, Hirsch 1984). Već su prva ispitivanja pokazala da npr. uz prosječne mjerne duljine (d) 200 m i 300 m i zenitne daljine između 90 gona i 110 gona, uz srednju pogrešku duljine ± 10 mm i kuta $\pm 0,3$ mgon ($\approx 1''$), pogreška visinske razlike iznosi $\pm 2,0$ mm, odnosno $\pm 3,0$ mm, što daje srednju pogrešku visinske razlike po km nivelmana: za $d = 200$ m $\pm 4,2$ mm/km, a za $d = 300$ m $\pm 4,5$ mm/km,

što odgovara točnosti mjerenja nivelirima srednjih točnosti. Nepovoljan utjecaj atmosfere refrakcije značajno se smanjuje obostranim simultanim mjerenjima zenitnih daljina na početnoj i krajnjoj točki svakog parcijalnog mjerenja visinske razlike. Uzme li se u obzir da je pri mjerenju kutova elektroničkim teodolitom već postignuta točnost $\pm 0,15$ mgon (npr. WILD TC2000, TM3000), a duljine elektroničkim daljinomjerom unutar 1 km do ± 5 mm, to su uz obostrano simultano mjerenje kutova moguća standardna odstupanja trigonometrijskog nivelmana ± 1 mm/km, što se može usporediti s točnostima geometrijskog preciznog nivelmana. Prema ispitivanjima izvršenim u Sekciji za geodeziju i kartografiju TU Dresden na jednoj test-mreži od 6 točaka s duljinama 157 m do 626 m pri mjerenjima zenitnih kutova optičkim teodolitima Theo 010A i Theo 010B u dva položaja durbina s tri niti uz simultano opažanje, te uz visine vizura 2 m do 30 m iznad terena, postignute su točnosti mjerenja visinskih razlika sa standardnim odstupanjima unutar 1 mm. I uz kvazisimultano mjerenje (čak uz vremenske razlike nekoliko sati pri stabilnom vremenu) moguće je postići jednako vrijedne rezultate (Möbius 1986). Slična ispitivanja izvršena su i u institutu za geodeziju Građevinskog fakulteta u Beogradu 1987. godine uz primjenu elektroničkog teodolita KERN E2 i elektroničkog daljinomjera KERN DM503 mjerenjem na operativnom poligonu s prosječnom duljinom stranica 0,3 km (min. 0,1 km; maks. 0,8 km). Uz metodu mjerenja: naprijed-natrag neistovremeno s prosječnim vremenskim razmakom od jednog sata, zenitne daljine su mjerene u tri serije s po pet mjerenja u seriji u toku cijelog dana i postignute su točnosti od 2,9 mm/0,3 km (Perović 1989).

Zbog potrebnog većeg broja mjerenja duljina i zenitnih daljina sam terenski postupak nije skraćen u odnosu na geometrijski nivelman no ovisno o zadatku i konfiguraciji terena, a posebno u brdovitim predjelima očita je prednost trigonometrijskog nivelmana, a da ne govorimo pritom i o višem stupnju automatizacije primjenom trigonometrijskog nivelmana. Radi povećanja brzine mjerenja vršena su i brojna ispitivanja primjene motoriziranog trigonometrijskog nivelmana uz prijenos instrumenata, kao i pribora prijevoznim sredstvima u toku mjernih operacija. Tako je npr. pri mjerenju kuta u dva položaja durbina na svakoj točki nivelmanskog vlaka (svaka točka je stajališna i ciljna točka) i trostrukom mjerenju duljine bilo potrebno oko 66 minuta po km nivelmana, a postignute su uz primjenu tahimetra KERN DKM 2-A + DM 500 srednje pogreške visinske razlike $\pm 3,9$ mm do $\pm 4,2$ mm/km u jednom smjeru (Kratsch 1978).

Novo ideje i konstrukcije u razvoju trigonometrijskog nivelmana idu za tim da se i nadalje poveća njegova točnost, odnosno efikasnost mjerenja uz automatizirane tokove. Spomenimo u tom smislu *paralaktičku metodu* trigonometrijskog nivelmana, koju su razvili Hageman, Nickel i Sauer (1984), o čemu su izvijestili na IX. internacionalnom kursu za inženjersku geodeziju u Gracu 1984. Kako je točnost mjerenja duljina elektroničkim daljinomjerima na kratkim duljinama ograničavajući faktor točnosti trigonometrijskog mjerenja visinskih razlika, to se paralaktičkom metodom ono svodi samo na mjerenje zenitnih daljina. Na točku do koje mjerimo visinsku razliku (udaljenost do 30 m) postavlja se vertikalno invarna nivelmanska letva, te viziranjem teodolitom na najmanje dvije točke (crte) letve, uz očitavanje letve, očitavaju se i odgovarajuće zenitne daljine. Razmak točaka na letvi je baza na cilju paralaktičkog trokuta. Ako su l_1 i l_2 očitavanja letve a Z_1 i Z_2 odgovarajuće zenitne daljine, visinska će razlika biti:

$$\Delta h = l_1 - \frac{(l_2 - l_1) \cdot \sin z_1 \cdot \cos z_2}{\sin(z_2 - z_1)}$$

Ispitivanja su pokazala da se uz približno istokračan paralaktički trokut na udaljenosti 20 m, uz srednju pogrešku mjerenog kuta $\pm 0,5$ mgon, postiže točnost mjerenja visinske razlike $\pm 0,15$ mm. Za automatsku registraciju zenitnih daljina pri manjim zahtjevima točnosti moguća je upotreba optičkih teodolita sa sensorima za mjerenje vertikalnog kuta u mjernom području od svega nekoliko gona. Umjesto običnih invarskih letvi i vizualnog očitavanja moguće je primijeniti specijalne letve s pomičnim vizurnim markama (vidi: automatizacija geometrijskog nivelmana). Elektroničkom teodolitu u tom se slučaju dodaje posebni modul s odašiljačem i prijemnikom za daljinsko upravljanje pomične vizurne marke na letvi kao sekundarnoj stanici, slično opisanom sistemu pri automatizaciji geometrijskog nivelmana. Primjenom takvog sistema moguće je, nakon izvršenog viziranja marke, sve podatke automatski registrirati i pomoću programiranog računala digitalno očitati visinsku razliku na pokazivaču, odnosno sve podatke pohraniti u memoriju (Benčić 1990).

Druga mogućnost automatizacije mjerenja primjenom paralaktičke metode data je simultanim mjerenjem zenitnih daljina s dva automatska sekundna teodolita. Mjerna letva izvedena od temperaturno stabilnog materijala s nizom ekvidistantnih prostornih marki postavlja se vertikalno u sredinu između stajališta teodolita A i B i automatski se istovremeno mjere zenitne daljine na marke: Z_1^A — Z_n^A i Z_1^B — Z_n^B . Mjerenjem na različitim mjestima u različitim visinama dobivamo informaciju o utjecaju refrakcije, o udaljenosti na osnovi programiranog računala, a izračunane visinske razlike i ostali podaci mogu se automatski registrirati. Pogreške instrumenata mogu se uzeti u obzir na osnovi programa, a veći broj prekobrojnih mjerenja daje mogućnost neposredne kontrole mjernog toka i rezultata. Pri duljini vizure d 30 m pogreška visinske razlike iznosi $\pm 0,1$ do $\approx 0,2$ mm (Hagemann, Nickel, Sauer 1984).

Pod vodstvom NOAA — Office of Charting and Geodetic Services USA radi se i na međunarodnom projektu u kojem sudjeluju Kanada i Finska pod nazivom RPLS (Rapid Precision Leveling System), a kojeg je realizaciju preuzela tvornica WILD iz Heerbrugga. U ovom projektu predviđa se razvijanje visokoautomatiziranog sistema s eliminacijom utjecaja refrakcije i značajno povećanom brzinom mjerenja (Huff 1987). U tu svrhu sistem RPLS imaće mogućnost primjene motoriziranog nivelmana. Sistematske pogreške, posebno utjecaj refrakcije, bit će automatski obuhvaćene, odnosno eliminirane.

AUTOMATIZACIJA GEOMETRIJSKOG NIVELMANA

Primarna svrha automatizacije geometrijskog nivelmana nije u povećanju točnosti, već u povećanju efikasnosti uz očuvanje odgovarajuće točnosti (Caspary 1988). No dok je pri mjerenju kutova i duljina, a time i pri trigonometrijskom nivelmanu, postignut istaknut napredak u automatizaciji, to nije dosada slučaj kod geometrijskog nivelmana, iako su prve značajnije automatizacije mjernog procesa postignute upravo kod nivelira. Osnovni razlog takvog zaostajanja jest u tome što je pri mjerenju kutova i duljina mjerni sistem jedinstven a pri mjerenju nivelirima su indeks za očitavanje i horizontalna vi-

zurna linija određeni optikom objektivna durbina i položajem nitnog križa, a mjerilo je na letvi prostorno odvojeno od instrumenta. Ova dvojnost sistema zorno se očituje kod preciznog mjerenja kada se durbinom vizira crta nivelmanske letve djelovanjem na vijak mikrometra, te se prvo očitava letva na ciljnoj točki i tom očitavanju dodaje se očitavanje mikrometra na niveliru.

Prva značajna automatizacija mjernog procesa izvršena je 1950. godine uvođenjem u tok zraka svjetlosti durbina malog optičkog elementa na njihalu, tj. ugradnjom kompenzatora za automatsko horizontiranje vizurne linije (ZEISS — OPTON Ni2). Značenje ove automatizacije dokazuje daljnji razvoj nivelira s automatskim horizontiranjem, koji se danas s nizom prednosti primjenjuju i za najpreciznija mjerenja. Idući korak u povećanju efikasnosti niveliranja bio je u primjeni motoriziranog nivelmana (Peschel 1974), gdje to uvjeti omogućavaju (rijedak promet na cestama gdje prolaze nivelmanski vlakovi i veći razmaci repera). Daljnji koraci u automatizaciji nivelmanskih radova bili su u primjeni elektroničkog zapisnika i terenskog računala (Beckers, Kuhr, Rumpf 1979). Unošenje podataka, umjesto u manual, izravno u elektronički zapisnik omogućilo je automatizaciju toka podataka od očitavanja do konačnih rezultata.

Ovim automatizacijama zadržan je u potpunosti klasičan način mjerenja uz osnovnu ulogu operativatora u mjernom procesu. Ostale su, dakle, dvije osnovne subjektivne operacije — viziranje i očitavanje, a uz to i zakretanje gornjeg dijela nivelira pri mjerenju visinske razlike. U daljnjem razvoju automatizacije upravo se u tome naišlo na niz poteškoća, pa su tim problemima posvećena brojna istraživanja u laboratorijima geodetskih instituta na visokim školama i fakultetima, te s tog područja istraživanja imamo i niz disertacija.

Prijedlozi i konstruktivna rješenja vrlo su različiti, od konstrukcija za djelomičnu automatizaciju nižeg ili višeg stupnja, pa sve do potpune automatizacije procesa mjerenja i registracije.

Prve su ideje u tom razvoju bile da se od instrumenta odašilju svjetlosni impulsi (npr. uz primjenu HeNe-lasera), te da se očitavanje automatski izvrši izravno na letvi, naravno specijalne građe. Time smo se u osnovi vratili, uz suvremena rješenja, na više od 2000 godina star način mjerenja pomoću Heronove dioptre kada se viziralo preko površine vode u cijevi oblika slova U na značku koja se ručno pomicala po nivelmanskoj letvi na cilju. U jednostavnom obliku ideja je realizirana suvremenom industrijskom proizvodnjom nivelira s rotirajućom glavom s emisijom laserskih impulsa koji realiziraju horizontalnu referentnu ravninu. U tom slučaju indeks na letvi pomiče se u tu ravninu bilo vizualnim promatranjem ili pomicanjem elektroničkog detektora (npr. AGA GEOPLANE 300). Postignuta su očitavanja samo cm-točnosti.

Ideja o automatskom očitavanju letve na cilju potekla je još od prvog idejnog tvorca digitalnog teodolita H. Zetschea (DIGIGON) s prijedlogom konstrukcije tzv. »digitalne« elektroničke letve još 1966. godine. Na Geodetskom institutu i Institutu za visokofrekventnu tehniku RWTH u Aachenu konstruirana je još pred dvadesetak godina fotoelektrična letva s fotodiodama (ukupne duljine oko 10 cm) za određivanje pozicije HeNe-laserske zrake što je emitira instrument. Postignute su točnosti reda veličine mm. Suvremenu konstrukciju predlaže Schlemmer (1987). godine. On primjenjuje HeNe-lasersku zraku koja se preko kompenzatora usmjeruje vertikalno, a zatim pomoću rotirajuće pentagonalne prizme (frekvencija okretaja i Hz) u horizontalnu referentnu ravninu. Digitalna elektronička letva ima mjerno područje 1,28 m, a sadrži niz fotodioda s razmakom od 5 mm, koji određuje i granicu moći razdvajanja digitalnog si-

stema. Obrada signala je prema tome na letvi tako da se rezultat očitava na LCD-pokazivaču na letvi, odnosno memorira. Instrument i letva imaju elektroničke senzore za automatsko mjerenje nagiba i korekciju rezultata. Taj se projekt dalje razvija. Pri ovim rješenjima nailazimo na dva osnovna problema — nestabilnost laserske zrake i ograničenu točnost »očitavanja« statičke letve zbog ograničene gustoće elemenata na letvi.

Industrijska proizvodnja automatiziranih nivelira krenula je zbog tih problema jednostavnijim putem. Tako su se uz primjenu mikroprocesora pojavili *elektronički niveliri* uz primjenu klasične nivelmanske letve. Ovi elektronički niveliri imaju djelomično automatiziranu registraciju mjerenih vrijednosti i digitalan pokaz. Kao tipičan primjer navedimo elektronički nivelir tvornice VEB Carl ZEISS — Jena RENI 002A (1986). Taj je nivelir razvijen na osnovi nivelira visoke točnosti iste tvornice Ni 002A s kompenzatorom visoke točnosti. Opažać obavlja klasično viziranje na crtu invarske podjele letve pomoću mikrometra. Grubo očitavanje na letvi unosi zatim pomoću tastature u memoriju računala, a fino očitavanje mikrometra automatski registrira analogno-digitalni pretvarač. Tastatura omogućuje unošenje svih dodatnih informacija, a svi mjereni podaci mogu se prenijeti pomoću međusklopke (interface) u računalo, kojim se mogu računati i sve potrebne korekcije na osnovi programa i podataka unijetih u memoriju mikroprocesora. RENI 002A registrira mjerni podatak na 0,01 mm, a srednja pogreška visinske razlike po km dvostrukog nivelmana prema podacima tvornice iznosi $\pm 0,2$ mm.

Koraci ka *potpunoj automatizaciji* elektroničkih nivelira usmjereni su, međutim, konstrukcijama s dinamičkom letvom, tj. s pomičnim fotodetektorom na letvi specijalne građe uz automatsku registraciju čitavog očitavanja.

Osnovna koncepcija preciznog nivelira s automatskom registracijom očitavanja zasniva se na primjeni letve s daljinskim upravljanjem vertikalnog pomaka vizurne marke (Caspary, Heister, Kurz 1986). Nivelir kao glavna stanica ima ugrađenu dodatnu elektroničku jedinicu s odašiljačem i prijemnikom. Pomoću dugmeta (analogno kao i u klasičnih nivelira vijkom mikrometra) djeluje se na odašiljač tako da on emitira IC-signal (infracrveni), kojim se daljinski upravlja funkcijom motora na letvi za pomak vizurne marke. Letva kao sekundarna stanica sadrži analogan digitalni mjerni sistem, koji se sastoji od sistema čeličnih kuglica duž kojeg klizi mjerna glava s ciljnom markom, a koju opažać vizira durbinom nivelira. Dakle, daljinskim upravljanjem motora na letvi opažać vizira pomičnu marku. U tu svrhu moguće je brzo pokretanje marke (30 cm/s) i fino pokretanje (0,02 mm/s). Nakon izvršenog viziranja pritiskom na dugme dobivamo ukupno digitalno očitavanje na pokazivačima na mjernoj letvi, kao i na instrumentu uz povratni prijenos preko IC-signala. Kako i glavna i sekundarna stanica imaju ugrađene mikroprocesore, to je moguće primijeniti automatske korekcije očitavanja (npr. uslijed nagiba letve, utjecaja temperature, refrakcije) uz daljnji automatski tok podataka. Zasad je realiziran i ispitivan prototip letve duljine 2,5 m, a postignute su točnosti preciznog nivelmana (Caspary 1988).

Pri ovoj konstrukciji ostala je, dakle, još jedina subjektivna mjerna operacija — viziranje.

Potpuna automatizacija mjerenja visinske razlike prikazana je u disertaciji H. Wüllera 1987, a zasnovana je na primjeni rotirajuće laserske zrake i fotoelektrične letve s pomičnim detektorom. Za praktična ispitivanja upotrijebljen je nivelir firme THEIS, TELAMAT. Kao izvor svjetlosti služi laserska

dioda sa zračenjem u IC-području spektra ≈ 800 nm. Optičko-mehanički kompenzator sastoji se od dvije leće, čvrste konveksne i pomične bikonkavne leće na njihalu. Svjetlosni izvor mora se nalaziti u žarištu optičkog sistema. Pomoću rotirajuće pentagonalne prizme laserska zraka se otklanja u horizontalnu ravninu. Fotoelektrična nivelmanska letva druga je komponenta sistema. Prijem laserskih impulsa vrši se pomoću detektora — diferencijalne fotodiode koju precizno vreteno pomiče duž letve pomoću motora, a prijedeni put fotodiode određuje se na osnovi automatskog brojenja impulsa. Uspion vretena iznosi 5 mm, a postignuta točnost izvedbe je $\pm 50 \mu\text{m}/300 \text{mm}$. Radi povećanja točnosti izvršena je interferometrijska kalibracija mjernog puta. Kako moć razdvajanja mjernog sistema iznosi $\pm 0,01$ mm (500 koraka motora za jedan okret), to uz pretpostavku da se izvrše korekcije s podacima kalibracije letve standardna devijacija određivanja visine laserske ravnine iznosi $\pm 0,05$ mm. Čitav mjerni tok memoriranjem i prijenosom podataka u računalo upravlja se pomoću mikroprocesora Z 80 na osnovi programa. Određivanje korekcije za atmosfersku refrakciju realizirano je mjerenjem vremena prolaza impulsa ultrazvučnih valova. Na osnovi vremenske razlike izvodi se integralni temperaturni gradijent, pa je moguća računaska korekcija podataka uslijed refrakcijskog otklona (Wüller 1987). Samo mjerenje u osnovi se zasniva na tome da se detektor pomoću motora pomiče duž letve tako dugo dok ga ne pogodi rotirajuća laserska zraka. No metoda traženja točne pozicije ima ukupno 11 iterativnih koraka i naziva se sukcesivnom aproksimacijom («binary search»). Prva praktična ispitivanja sistema TELAMAT i fotoelektrična letva na terenu na duljini 62,5 m dala su standardnu devijaciju mjerene visinske razlike $\pm 0,52$ mm, što znači i standardnu devijaciju po 1 km dvostrukog nivelmana u iznosu $\pm 1,47$ mm. H. Wüller smatra da je uzrok većoj pogrešci od očekivane u funkciji kompenzatora, pa će se uz poboljšane konstrukcije kompenzatora ovaj potpuno automatizirani sistem moći primijeniti i u preciznom nivelmanu.

Geometrijski nivelman, iako s vremenskim zaostajanjem, uključen je daleko, u tok suvremenih procesa automatizacije mjerenja te će, u serijskoj proizvodnji biti i potpuno automatizirani sistemi.

U novim uvjetima tehnološkog razvoja uz primjenu novih tehnologija integrativno će se primjenjivati klasične metode mjerenja ali s automatiziranim sistemima. U novo tisućljeće ući ćemo s programiranim robotskim stanicama, s kojima će operatori daljinski korespondirati, a terenskoj opremi nužno će pripadati i prijenosna interaktivna emisijska stanica i prijenosno terensko računalo s monitorom, odgovarajućim softverom (uz uključenje vlastite programe i sve relevantne podatke) uz visok kapacitet RAM-memorije.

LITERATURA

- Beckers, H., Kuhr, H. H., Rumpf, W. E.: Automatische Datenerfassung und -auswertung beim Präzisionsnivellement, AVN 1979, 86, 178—193.
- Benčić, D.: Geodetski instrumenti, Školska knjiga, Zagreb 1990.
- Benčić, D., Lasić, Z.: Automatizacija geodetskih mjerenja, Geodetski list, 1987, 1—3, 75—83, 4—6, 149—161.
- Caspary, W.: Zur Automatisierung des Nivellements, ZfV 1988, 9/10, 437—444.
- Caspary, W., Heister, H., Kurz, B.: Ein Beitrag zur Automatisierung des geometrischen Nivellements, ZfV 1986, 8, 361—366.
- Deumlich, F.: Die geodätischen Instrumente in der Entwicklung von der klassischen zur modernen Landesvermessung, Vermessungstechnik 1988, 4, 125—127.

- Groten, E.: Inertialgeodäsie im Rahmen moderner Vermessungsmethoden, AVN 1988, 95, 201—212.
- Hagemann, M., Nickel, F., Sauer, B.: Trigonometrisches Nivellement mit paralaktischer Zenitdistanzmessung, IX internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz 1984.
- Hirsch, O.: Zur Genauigkeit des trigonometrischen Nivellement vom optischen zum Informatiktheodolit, IX Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz 1984.
- Huff, L. C.: The Rapid Precision Leveling System. Surveying and Mapping 1987, 41, 99—102.
- Kratsch, H.: Zur Leistungsfähigkeit des trigonometrischen Nivellements, Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 1978, 85, 163—182.
- Möbius, G., Oliberius, P.: Zur Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessungen in ingenieurgedächten Netzen. Vermessungstechnik 1986, 10, 348—351.
- Perović, G.: Savremeni trigonometrijski nivelman kratkih strana u standardnim uslovima, Geodetski list 1989, 4—6, 107—118.
- Peschel, H.: Das Motorisierte Nivellement — leistungsfähigstes Verfahren genauer Höhenmessungen, Vermessungstechnik 1974, 22, 57—64.
- Rüeger, J. M., Rrunner, F. K.: EDM-Height Traversing versus Geodetic Leveling, The Canadian Surveyor, 1982, 36, 69—88.
- Scherer, M.: Das Elektornische Tachymeter-Universal-Vermessungsinstrument der Gegenwart, AVN 1988, 8—9, 292—300.
- Schlemmer, H.: Zur digitalen Ablesung an Nivellierlatten, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 1987, Nr 326.
- Wüller, H.: Entwicklung und Untersuchung eines Rotationsnivellierungsinstrumentes und einer photoelektrischen Nivellierlatte zur Automatisierung des geometrischen Nivellements, Dissertation, AVN 1989, 3, 131.
- Zetsche, H.: Beiträge zur Konstruktion von geodätischen Feldinstrumenten mit digitaler Daten-Ausgabe, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 88. 1966.

AUTOMATIC MEASUREMENT OF HEIGHT DIFFERENCES

The paper offers a survey of the development of the height differences measurement and the heights of points determination, particularly regarding the trigonometric and the geometric levelling. The problems in the automatization of the geometric levelling and the most recent solutions for a complete automatization are especially stressed.

Primljeno: 1990-04-05