

PODRUČJA GEODETSKIH ISTRAŽIVANJA UTJECAJA ATMOSFERE

Dušan BENČIĆ, Zlatko LASIĆ — Zagreb*

SAŽETAK. Izuzetno široka problematika utjecaja atmosfere u geodetskim mjerenjima proučava se u brojnim specifičnim područjima. U ovom je radu opisana problematika utjecaja atmosfere na mjerne procese, a zatim i osnovna istraživanja u različitim područjima. Uz težnju za eliminacijom utjecaja atmosfere na rezultate mjerenja, u novije vrijeme sve se više razvijaju fizikalne metode s mogućnošću atmosferske korekcije rezultata.

U realnoj atmosferi refrakcijsko polje karakterizira utjecaj atmosfere na mjerne procese, a određeno je prostornom raspodjelom indeksa loma zraka. Interes geodeta svodi se u prvom redu na problematiku prolaza elektromagnetskih valova koji nose mjernu informaciju, a zatim i na utjecaj atmosfere na kvalitetu i deformaciju optičke slike, odnosno općenito, prijama i registracije valova na mjernom instrumentu. Prolaz elektromagnetskih valova podvrgnut je fizikalnim zakonitostima koje su u osnovi formulirane Fermatovim principom (Benčić, 1971). Kontinuirana promjena indeksa loma na putu valova, tj. promjena gustoće optičkog sredstva uzrokuje adekvatne promjene brzine elektromagnetskog vala, a time i promjene smjera širenja kao međusobno uvjetovanih veličina. Međutim, stalne vremenske promjene refrakcijskog polja usložu istraživanja i primjenu korekcijskih formula na rezultate mjerenja, stoga je izuzetno važno poznavati stanje refrakcijskog polja u času mjerenja. Dodamo li k tome pojavu turbulentnih kretanja, posebno u nestabilnoj atmosferi, to je složenost problema očita (Benčić, Lasić, 1992).

S obzirom na mjerne procese, djelovanje atmosfere, prema tome, uzrokuje:

- promjenu brzine elektromagnetskih valova uslijed varijacije gustoće refrakcijskog polja, a promjena brzine je funkcija valne duljine,
- sustavno odstupanje položaja slike vizurnog objekta na prijamnom instrumentu uslijed zakrivljenosti puta, tj. trajektorije elektromagnetskog vala zbog *refrakcije*, kao posljedica promjene brzina valova,
- trenutni pomak optičke slike slučajnog karaktera uslijed turbulencije zračnih slojeva. Turbulentne zračne mase definiraju fazne odnose zraka svjetlosti što dovodi do kolebanja smjera zraka i fluktuaciju upadnih kutova, a očituje se kao titranje slike s kratkom periodičnošću. Amplituda ovih titraja

* Prof. dr. Dušan Benčić i mr. Zlatko Lasić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26.

ovisi o jakosti turbulentnih kretanja u zavisnosti o insolaciji, brzini vjetra, sastavu i neravnosti tla, tj. karakteru podloge iznad koje prolazi vizura, te duljini i visini vizure.

Već je Kukkamäki opsežno istraživao titranje slike i to njegovu horizontalnu i vertikalnu komponentu (Kukkamäki, 1950) na duljinama 25 do 150 m prema uzoru na prva praktična ispitivanja (Smith, 1895) uspoređujući prividni pomak nitnog križa durbina preciznog nivelira u crtama različitih širina na cilju. Eksperimentiranjem je dobio slijedeći odnos vertikalne i horizontalne komponente:

$$\frac{f_v}{f_h} = 1,34 \pm 0,05.$$

Za ovisnost vertikalne komponente o udaljenosti d , dobio je:

$$f_v = a d^{1,68},$$

gdje je eksponent određen na osnovi izjednačenja s nesigurnošću $\pm 0,04$, a koeficijent a je ovisan o temperaturnom gradijentu.

Prema ispitivanjima Mosora (1987), pri maksimalnim negativnim temperaturnim gradijentima $-0,8$ do $-1,0$ K/m amplituda titraja dostiže 3,5 mm na duljini 50 m uz maksimalne frekvencije 6 do 8 titraja u sekundi, a uočeno je i slijedeće:

— promjenljivi pomak optičke slike s većom periodom (nekoliko minuta) poznat pod imenom »lebdenje ili vučenje slike«, a pojavljuje se u vremenu promjene predznaka temperaturnog gradijenta ujutro i naročito uvečer za vrijeme vrlo dobre vidljivosti, kad zbog laganog kretanja zračnih jastučića određene gustoće, često dolazi do neuočljivog pomaka slike, što može uzrokovati pogreške sustavnog karaktera,

— redukcija optičke vidljivosti odnosno jakosti povratnog signala, a time i dosega mjerenja uslijed apsorpcije energije elektromagnetskih valova,

— pomućenje optičke slike sve do nejasnoća slike uslijed promjene kontrasta, titranja slike i apsorpcije valova.

Ovome moramo dodati utjecaje štetnih refleksa, lažnih signala, utjecaj insolacije i atmosferskih promjena na mjerni instrument, kao i uređaje na cilju, pa da široka problematika pri mjerenjima u terenskim uvjetima bude evidentna.

S obzirom na takvu složenost utjecaja atmosfere u geodetskim mjerenjima, kao i na specifične problematike u pojedinim granama geodezije, te s obzirom na primjenu različitih mjernih metoda, geodetska istraživanja se obično rađuju u nizu praktičnih područja.

Kad je izvor i prijatelj energije svjetlosnih valova postavljen na površini zemlje, refrakciju nazivamo *zemaljskom* ili *geodetskom refrakcijom*. Metode ispitivanja i određivanja utjecaja ove refrakcije na geodetska mjerenja proučavaju se u *geodetskoj refraktometriji*. Ona sadrži opširnu oblast znanosti. Kut između tangente na krivulju refrakcije i njene tetive (pravca između točaka izvora i prijama vala), razlaže se na refrakcijske kutove u

vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, pa proučavamo njihove utjecaje na točnost mjerenja vertikalnog odnosno horizontalnog kuta. Time dolazimo do pojma *vertikalne refrakcije* i *horizontalne refrakcije* koju nazivamo i *bočnom refrakcijom*. Zbog specifične problematike (mala visina i relativno kratka duljina vizure) vertikalnu refrakciju proučavamo posebno pri nivelmanu i nazivamo je *nivelmanskom refrakcijom*. Pri mjerenju visinske razlike nivelrom i uz jednake duljine vizure u razdoblju nestabilne stratifikacije, utjecaj refrakcije pri očitajima obje letve nije isti, pa govorimo o *diferencijalnoj refrakciji*.

U području vertikalne refrakcije istražuje se krivulja refrakcije, promjena refrakcijskih kutova ili linearnih odstupanja uslijed refrakcije u ovisnosti o dobi dana, kao i utjecaj brojnih faktora, naročito brzine vjetra, karaktera podloge, visine vizure, te se ukazuje na optimalna razdoblja za mjerenja odnosno predlažu se različite korekcijske formule.

U posljednjih dvadesetak godina razvija se posebno područje istraživanja mjerenjem amplituda titraja slike. Već je V. J. Struve u prošlom stoljeću uočio vezu refrakcije i nemirnoće slike u durbinu, a Iztov i Pelinen (1955) postavljaju vezu između titranja slike i temperaturnog gradijenta čime se uočuje i fizikalna korelacija amplitude titranja s veličinom utjecaja refrakcije. Titranje slike i refrakcija s negativnim temperaturnim gradijentom imaju isti uzrok, stoga je logično da između ovih pojava postoji stohastička veza. Time se *veličina amplitude* pojavljuje i kao objektivni informator o *stupnju utjecaja* refrakcije u *trenutku mjerenja* (Staščišin, 1977). Ispitivanja su rezultirala i ukazivanjem na mogućnosti redukcije računatih visinskih razlika na periodu mirnih slika na osnovi izmjerenih amplituda (Džuman, 1977, 1979). Ova se istraživanja fizikalnih metoda nastavljaju radi mogućnosti automatizacije korekcija uslijed refrakcije. Automatizacija na osnovi mjerenja amplituda titraja tehnički je lakše izvediva no što je npr. slučaj primjene disperzometra.

Uslijed titranja slike, kao i primjene kontrasta djelovanjem atmosfere, dolazi i do pomućenja slike u durbinu, tj. promjene moći razdvajanja, pa se istraživanja proširuju novim mogućnostima ispitivanja utjecaja refrakcije (Vinogradov et al., 1985) relativno jednostavnim metodama. Značajno je što ove metode ispitivanja obuhvaćaju integralno djelovanje atmosfere u trenutku opažanja.

Kad je izvor elektromagnetskih valova izvan Zemlje, a prijammnik na Zemlji, onda se problemi refrakcije proučavaju u području *astronomske refrakcije*.

Ispitivanje opažanja satelita optičkim metodama u geodetske svrhe povezano je s proučavanjem posebnog vida refrakcije koju nazivamo *satelitskom* ili *paralaktičkom refrakcijom*. Ovo područje istraživanja razvijalo se na osnovi modifikacije teorije astronomske refrakcije. Opažanja satelita u geodetske svrhe uključuju i mjerenja duljina optičkim i radiotehničkim uređajima, pa se zadaci proučavanja povezuju sa saznanjima optičke i radio refrakcije.

Optičku i *radiorefrakciju*, u kojima proučavamo refrakciju odgovarajućih duljina valova, promatramo do nekog stupnja odvojeno. Naime, fizikalni

zakoni vrijede jednako za sve elektromagnetske valove, i na njihovo se djelovanje očituju različito pri razlikama valnih duljina. Posebno su razlike izraženije u djelovanju atmosfere pri većim razlikama valnih duljina. Zakonomjernosti radiorefrakcije su složenije zbog toga što različiti slojevi zemaljske atmosfere imaju različita elektromagnetska svojstva određujući uvjete širenja radio-valova. Na osnovi toga i radiorefrakciju proučavamo dijeleći je na *troposferu* i *ionosferu* refrakciju (Izotov, 1975).

Napomenimo i posebne vidove proučavanja optičke refrakcije u području fotogrametrije, što je dovelo do razvoja *fotogrametrijske refrakcije*. U prvom razdoblju razvoja aerofotogrametrije odnosno restitucije aerosnimaka, nije se obziralo na utjecaj refrakcije, a niti na Zemljinu zakrivljenost, zbog toga što je kvaliteta objektiva aerokamera dozvoljavala samo 2/3 danas primjenljive relativne visine leta, a nije bilo širokokutnih, a pogotovo ne superširokokutnih, aerokamera (Braun, 1980). Na svom putu kroz atmosferu, od Zemljine točke do snimališta, zrake svjetlosti će se lomiti, pa će se svjetlosni fotoni kretati krivuljom što će uslijed refrakcije, uzrokovati deformaciju snimaka odnosno modela. Utjecaj refrakcije e to veći, što je veće vidno polje kamere i što je veća relativna visina leta. Utjecaj refrakcije na deformacije modela, na visine modela, na slikovne i modelne koordinate, vrlo detaljno analizira i opisuje prof. dr. F. Braun u svom udžbeniku (1980).

U području primjene *laserskih uređaja*, zakonitosti širenja laserske zrake u atmosferi proučavaju se ne samo u zavisnosti o optičkim karakteristikama i uvjetima atmosfere, već posebno i o utjecaju karakteristika samih laserskih uređaja.

Vrlo široko i značajno područje ispitivanja utjecaja atmosfere razvijeno u drugoj polovini ovog stoljeća je u oblasti *elektroničkog mjerenja duljina*. Do tog razdoblja sva je pozornost bila poklonjena utjecaju refrakcije pri *optičkom* mjerenju duljina, te u tom području imamo brojne znanstvene radove. Spomenimo samo dvije, pri kraju ovog prvog razdoblja izrađene, istaknute disertacije uglednih profesora Tehničke visoke škole u Dresdenu, G. Bahnerta: »Istraživanja utjecaja opažача, temperature i stanja atmosfere na precizno optičko mjerenje duljina«, 1958. i F. Deumlich: »Utjecaj refrakcije u prizemnom sloju pri optičkom mjerenju duljina s vertikalnom letvom« 1963. Iako ova istraživanja spadaju već u povijest geodezije, ipak znatan broj podataka ima i danas svoju aktualnost.

Pri elektroničkom mjerenju duljina, utjecaj atmosfere je utoliko složeniji što mjerene duljine mogu biti znatno veće nego pri optičkom mjerenju, pa raznolik utjecaj atmosfere dolazi do punog izražaja:

— trajektorija elektromagnetskih valova je zakrivljena uslijed refrakcije, a kako je indeks loma ovisan i o valnoj duljini, to djelovanje atmosfere na valove različitih valnih duljina nije jednako, pa trajektorije zraka spektra nisu jednake; na toj osnovi razvijeno je i novo područje istraživanja refrakcije — *dispersionometrija*;

zbog nehomogenosti i vremenske promjenljivosti refrakcijskog polja, duž trajektorije dolazi do varijacije *brzine valova*, ali mi još nemamo pogodnog termina kojim bismo označili pojam o izmjeni brzine širenja elektromagnetskih valova u atmosferi (Izotov, 1975).

Kao što je poznato, temeljni princip elektroničkog mjerenja duljina zasniva se na mjerenju vremenskog intervala prolaza elektromagnetskih valova

uz poznavanje brzine valova (Benčić, 1990). Problem se na taj način svodi na što bolje poznavanje stanja refrakcijskog polja i određivanja reprezentativnog indeksa loma trajektorije. Pri mjerenjima najviših točnosti nastoji se riješiti metodama disperzometrije, kao i računanjem indeksa loma u pojedinim točkama trajektorije na osnovi mjerenja meteoroloških parametara i drugih relevantnih podataka na pristupačnim i karakterističnim točkama profila terena korištenjem turbulentnog modela atmosfere, o čemu je već pisano u ovom stručnom časopisu (Benčić, Lasić, 1992).

Zanimljiva su novija istraživanja u specifičnim područjima refrakcije, kao što je npr. *elektrooptička refrakcija*. U ovom slučaju radi se o proučavanju utjecaja elektromagnetskih polja istosmjerne i izmjenične struje na promjenu optičkih svojstava optičkog sredstva pa time i otklona zraka svjetlosti, a to znači i refrakciju u atmosferi pri geodetskom mjerenju. Ovi su utjecaji izraženi razvojem industrije, prijenosnih i željezničkih mreža. Na osnovi formiranja matematičko-fizikalnog teoretskog modela i simulaciju djelovanja električnog istosmjernog polja, uz pretpostavku konstantnih meteoroloških parametara (temperatura, pritisak, vlaga), izvršena su ispitivanja zakrivljenosti krivulje refrakcije, kao i račun refrakcijskih kutova. Ispitivanja su pokazala utjecaj elektrooptičke refrakcije u iznosima nekoliko sekundi (Brys, 1990). Praktična ispitivanja pri mjerenjima horizontalnih kutova u okolišu elektromagnetskog polja 330 kV vodova struje visokog napona jakosti 30 do 50 A, pokazala su pogreške pravca 2,7" (Kketko et al., 1988).

Pri istraživanjima utjecaja atmosfere u geodetskim mjerenjima, posebno je područje istraživanja vidljivosti i dosega mjerenja uslijed apsorpcije energije elektromagnetskih valova te pomućenja slike promjenom kontrasta. Pri optičkim mjerenjima, mjerenje je preciznije, ako je ono za oko manje zamorno, tj. ako je preglednija i jasnija slika u durbinu. Kvaliteta slike ovisi prema tome o vidnom kutu pod kojim vidimo sliku mjernog objekta i kontrasta slike. Iako se vidni kut može povećati odgovarajućim povećanjem durbina (npr. izmjenom okulara), turbulencija atmosfere može ovaj učinak preglednosti slike poništiti, pa je čak i bolje pri većim amplitudama titranja slike koristi manje povećanje durbina, koje se, posebno pod utjecajem atmosfere, zbog apsorpcije svjetlosti i turbulentnih kretanja, neizbježno smanjuje. Posljedica toga je, da se u određenim uvjetima i stanju atmosfere, ovisno i o udaljenosti cilja, preciznost mjerenja bitno smanjuje. S druge strane, praćenje slike u durbinu predmet je posebnih istraživanja, budući da se mjerenjem smanjenja kontrasta pri preslikavanju, kao i promjene moći razdvajanja durbina u uvjetima nestabilne atmosfere, može ispitati utjecaj atmosfere na mjerni proces, ali i kvaliteta optike durbina u realnim uvjetima opažanja. Ispitivanja pomoću testova pokazala su kako se durbini jednakih tehničkih karakteristika i približno jednake moći razdvajanja u optimalnim uvjetima razlikuju u kvaliteti pri opažanjima u terenskim uvjetima (Mikalčak, 1966). U okviru istraživačkih radova na znanstvenom zadatku: »Istraživanja mjerne tehnike, automatizacije i metode mjerenja« u Geodetskom fakultetu u Zagrebu, konstruirali smo specijalne testove za ispitivanje moći razdvajanja durbina na terenu na udaljenostima od 100 do 800 m, u svrhu ispitivanja utjecaja atmosfere, ali i u svrhu prijedloga za standardizaciju ispitivanja kvalitete durbina u realnim mjernim uvjetima.

ZAKLJUČAK

Dugogodišnjim istraživanjima utjecaja atmosfere u geodetskim mjerenjima razvijena su različita specifična područja koja su u novije vrijeme značajno proširena zbog općeg tehnološkog i industrijskog razvoja i već, po tome, i primjene mjernih tehnologija te metoda geodetske refraktometrije.

Sve veći zahtjevi na točnost i ekonomičnost geodetskih mjerenja zahtijevaju i što potpuniju eliminaciju utjecaja sustavnih pogrešaka mjerenja. Razvojem sve točnijih i kvalitetnijih geodetskih instrumenata s visokim stupnjem automatizacije, uz primjenu računskih modela odgovarajuće matematske strogoće, upravo sve više dolaze do izražaja sustavne pogreške uslijed utjecaja atmosfere na rezultate mjerenja. Stoga je i razumljivo što se u ovim istraživanjima danas čine dodatni napori.

Suvremena istraživanja utjecaja atmosfere, s jedne strane, koriste i suvremene mogućnosti posebno primjenom računske tehnike i matematičko-fizikalnih modela, a s druge strane, usredotočena su na fizikalne metode refraktometrije koje pružaju realne mogućnosti ostvarenja automatske korekcije rezultata mjerenja zbog refrakcije.

LITERATURA

- Benčić D. (1971): Geodetski instrumenti, Optika, udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb,
- Benčić D. (1990): Geodetski instrumenti, Školska knjiga, Zagreb,
- Benčić D., Lasić Z. (1992): Fizična osnova utjecaja atmosfere u geodetskim mjerenjima, Geodetski list, 4, 437–449,
- Braum F. (1980): Orijentacija fotogrametrijskih snimaka IV. Apsolutna orijentacija i deformacija modela, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- Brys H. (1990): Modell der elektrooptischen Refraktion und ihr Einfluss auf präzise Winkelmessungen, ZfV, 9, 365–372.
- Džuman, B. M. (1977): Reduciranje izmerenih zenitnih rastojanij na periodi spokojnih izobraženij po vertikalnim kolebanijem izobraženij vizirnih celej Geodezija, kartografija, aerogotos'enika 28. 17–22.
- Džuman, B. M., Pavliv, P. V., Straščišin, I. I. (1979): Metod opredelenja nivelirnoj refrakciji, Geodezija, kartografija i aerofotos'emka, 30, 66–69
- Izotov A. A. (1975): Soobraženija ob isledovanijah v oblasti atmosfernoj refrakcii. Geodezija i kartografija, 1, 12–16.
- Kmetko I. N., Kravzov N. I., Litinskij W. O. (1988) Isledovanie vlijanija elektromagnetogo polja (EMP) Lep na točnost geodezičeskijh izmerenij. Geodezija, kartografija i aerofotos'emka, 20–23.
- Kukkamäki T. J. (1950): Über das Flimmern und Schweben der Zielbilder, Geofisica pura e applicata Nr 18, 120.
- Mihalčak S. (1966): Zum Einfluss der atmosphäre bei geodätischen Messungen, ZfV, 1, 34–39.
- Moros A. (1987): Untersuchungen der nivellistischen Refraktion in der bodennahen Luftschicht au Hand des Bildflimmerns, Dissertation, Dresden.
- Smith S. L. (1895): An experimental study of field methods which will insure to stadia measurements greatly in creased accuracy. Bulletin of the University of Wisconsin, Engineering Series Vol. 1, 101.
- Vinogradov V. V., Sukov G. H., Medovikov A. C., Šaranov V. V. (1985): Opređenje refrakcii pri geodezičeskom nivelirovanii po razmytiju izobraženija reguljarnih struktur. Geodezija i aerofotos'emka, 2, 32–39.

AREAS OF GEODETIC RESEARCH IN THE FIELD OF ATMOSPHERIC INFLUENCES

The extraordinary extensive problems of atmospheric influences in geodetic measurements are explored in numerous specific scientific areas. The present work describe the problem of atmospheric influences onto the measuring processes and furthermore, the major researches in different areas. The aspiration to eliminate the atmospheric influences on the reesults of measurement is now-a-days accompanied more and more by the development of physical methods with the possibility of atmospheric correction of the results.

Primljeno: 1993-10-11