

## PRAKTIČNA METODA IZRAČUNAVANJA MODIFICIRANOG INDEKSA LOMA ZA MIKROVALNO ZRAČENJE IZ AEROSON-DAŽNIH MJERENJA

### A Practical Method for Computing the Modified Refraction Index for Microwave Radiation from Atmospheric Probing Measurements

MLADEN VIHER

Državni hidrometeorološki zavod  
Grič 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

*Primljeno 15. siječnja 1996, u konačnom obliku 5. veljače 1996.*

**Sažetak** — Polazeći od modela potencijalne radarske vidljivosti (Bajić, Viher 1993) ispitivala se valjanost pretpostavke standardne refrakcije primjenjene u modelu. Ostvaren je i praktični postupak za otkrivanje pojave radio kanala u atmosferi. U radu je pokazano znatno odstupanje prirodnih od standardnih vrijednosti vertikalnog gradijenta indeksa loma što upućuje na potrebu modeliranja širenja mikrovalnog zračenja u nestandardnoj atmosferi. Izveden je skup jednažbi koje predstavljaju osnovu za GIS radara u nestandardno stratificiranoj atmosferi.

*Ključne riječi:* refrakcija mikrovalova, radio kanal, Voronojeve ćelije, GIS radara

**Abstract** — Starting with model of potential radar visibility (Bajić and Viher 1993) validity of standard refraction presumption in the model is examined. Practical method for detection of the radio duct in the atmosphere is realised. In this work considerable deviations between natural and standard values of the vertical refractive index gradient are shown. This fact directs to need for modelling of microwave propagation in non-standard atmosphere. Set of equations that represent the basis for GIS of radar in non-standard stratified atmosphere was evaluated.

*Keywords:* microwave refraction, radio duct, Voronoi cells, radar GIS

#### 1. REFRAKCIJA RADIO VALOVA U ATMOSFERI

Temeljna veličina za izračunavanje trajektorije radio valova u atmosferi je indeks loma za radio valove. Promjene vertikalnog gradijenta indeksa loma uvjetuju i promjene u smjeru širenja radio valova što ima velike posljedice za praktičnu primjenu.

Indeks loma za radio valove jako ovisi o količini vodene pare u zraku. Nju izražavamo pomoću parcijalnog tlaka vodene pare ( $e$ ). Utjecaj vodene pare na prolazak elektromagnetskog zračenja nastaje

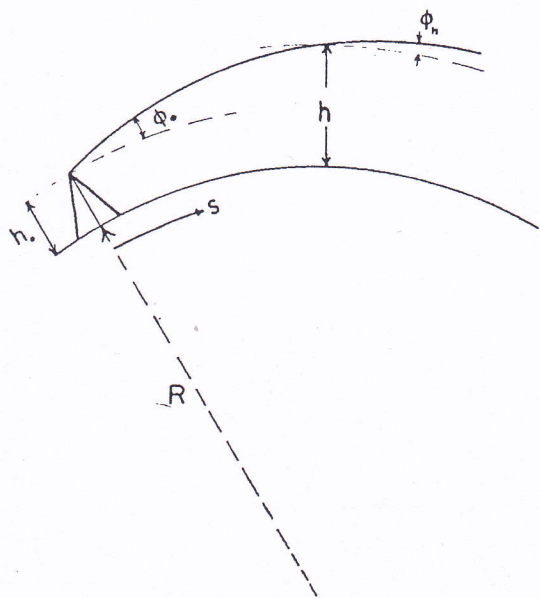
zbog električki dipolne građe molekula vode. Iznos indeksa loma ovisi i o frekvenciji elektromagnetskog zračenja koje prolazi kroz vlažan zrak. Kod svjetlosnog zračenja, koje ima frekvencije puno veće od frekvencije radio valova, orijentacija električnog polja molekule vode ne može slijediti brze promjene orijentacije električnog polja svjetlosnog zračenja. U slučaju radio valova za to ima dovoljno vremena pa se orijentacija električnih polja molekula vode mijenja u ritmu prolazećeg vala. Direktna posljedica je različit indeks loma za svjetlosne i radio valove (iznos je veći za radio valove). Formula za izračunavanje indeksa loma za područje radio valova valnih duljina većih od 2 cm

(frekvencije do 15 Ghz) dobivena je empirijski (Battan, 1973):

$$N = (n-1)10^6 = \frac{79[K \cdot hPa]}{T} \left( p - \frac{e}{7} + \frac{4800[K]e}{T} \right) \quad (1)$$

U izrazu (1)  $T$  je termodinamička temperatura u kelvinima,  $p$  je tlak zraka u hektopaskalima i  $e$  je parcijalni tlak vodene pare u hektopaskalima. Indeks loma ( $n$ ) nije praktična jedinica jer se kod nje mijenja tek peta-šesta decimale, zato ga izražavamo u "N jedinicama" koje su upravo samo značajne decimale indeksa loma. Ulazne fizikalne veličine mjere se redovitim balonskim sondiranjima atmosfere i to nam omogućava izračunavanje indeksa loma.

Za računanje promjene indeksa loma s visinom (što je zbog utjecaja na domet radio valova najveća primjena ovog postupka) povoljnije je uzimati



Slika 1. Veličine u izvodu za trajektoriju radio valova u troposferi.  $R$  je polumjer Zemlje,  $h$  je nadmorska visina,  $s$  je udaljenost mjerena po površini Zemlje, a  $\phi_0$  i  $\phi_h$  su kutevi koje zraka zatvara u odnosu na lokalnu horizontalu. Iz: Battan: "Radar Meteorology", chapter 3.2; "Refraction in the Lower Troposphere".

Figure 1. Terms in the evaluation of a radio wave path in the troposphere. The earth's radius  $R$ , height above sea level  $h$ , distance along the Earth's surface  $s$ , and angles between ray and the local horizontal plane  $\phi_0$  and  $\phi_h$ . From: Battan, "Radar Meteorology", Chapter 3.2; Refraction in the Lower Troposphere.

modificirani indeks loma koji je normiran omjerom nadmorske visine na kojoj se računa indeks loma i radijusa zakrivljenosti Zemlje ( $R_Z = 6371007$  m). Zbog kasnije diskusije međurezultata navest ćemo na ovom mjestu završni dio Appletonovog izvoda za trajektoriju radio valova u troposferi (Battan, 1973).

Appletonova jednadžba za sferno stratificiranu atmosferu u razvijenom obliku izgleda:

$$\frac{d^2h}{ds^2} - \left( \frac{2}{R+h} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \right) \left( \frac{dh}{ds} \right)^2 - \left( \frac{R+h}{R} \right)^2 \left( \frac{1}{R+h} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \right) = 0 \quad (2)$$

Prirodni iznosi veličina omogućavaju aproksimacije koje rezultiraju bitnim pojednostavljenjem jednadžbe (2):

- kut  $\phi$  je mali tako da je  $(dh/ds)^2 \ll 1$
- $n \approx 1$
- $h \ll R$

slijedi pojednostavljeni oblik:

$$\frac{d^2h}{ds^2} = \frac{1}{R} + \frac{dn}{dh} \quad (3)$$

Za određivanje kuteva  $\phi$  integriramo jednadžbu (3):

$$\left( \frac{dh}{ds} \right)^2 = 2 \int \left( \frac{1}{R} + \frac{dn}{dh} \right) dh + konst. \quad (4)$$

Budući da su kutevi  $\phi$  mali, možemo pisati:

$$\frac{\Phi_h^2}{2} - \frac{\Phi_0^2}{2} = \frac{h-h_0}{R} + n - n_0 = \left( \frac{h}{R} + n \right) - \left( \frac{h_0}{R} + n_0 \right) \quad (5)$$

gdje uvodimo veličinu *modificirani indeks loma*,  $M$ :

$$M = \left[ \frac{h}{R} + (n-1) \right] \cdot 10^6 \quad (6)$$

pa (5) možemo pisati:

$$\frac{\Phi_h^2}{2} - \frac{\Phi_0^2}{2} = (M - M_0) \cdot 10^6 \quad (7)$$

Modificirani indeks loma izražavamo u "M jedinicama" koje su, poput "N jedinica", značajne decimale indeksa loma. Postoji jednostavna veza  $N$  i  $M$ , prema (6):

$$M = \frac{h}{R} \cdot 10^6 + (n-1) \cdot 10^6 = \frac{h}{R} \cdot 10^6 + N \quad (8)$$

a iz nje izvodimo odnos vertikalnih gradijenata indeksa loma i modificiranog indeksa loma:

$$\frac{dM}{dh} = \frac{10^6}{R} + \frac{dN}{dh} \Rightarrow \frac{dN}{dh} = \frac{dM}{dh} - \frac{10^6}{R} \quad (9)$$

Vertikalni gradijent indeksa loma od  $(dn/dh) = -4 \cdot 10^{-8}$  po metru visine, odnosno  $-40 N$  po kilometru visine, smatra se standardnom refrakcijom u troposferi za radio valove. Preporučamo korištenje mjernih jedinica  $Nkm^{-1}$  jer se pomoću njih dobivaju lako usporedivi iznosi, uz napomenu da je vertikalni gradijent indeksa loma vrlo promjenjiva veličina. Izraženo u vertikalnom gradijentu modificiranog indeksa loma to iznosi  $(dM/dh) = 117 Mkm^{-1}$ .

U prirodi, što smo željeli i pokazati ovim radom, vertikalni gradijenti indeksa loma variraju s visinom i značajno odstupaju od standardne vrijednosti. Ako je pad vrijednosti indeksa loma s porastom visine veći od standardne vrijednosti, onda naglije raste brzina širenja elektromagnetskih valova s visinom. Posljedica je smanjenje zakrivljenosti zrake. Ovaj slučaj nazivamo subrefrakcija.

Superrefrakcija nastaje kada je aktualni pad vrijednosti indeksa loma manji od standardne vrijednosti, a zakrivljenost zrake je još uvijek manja od zakrivljenosti Zemlje.

Radi lakšeg modeliranja širenja elektromagnetskog zračenja kroz atmosferu, mijenjamo iznos polumjera Zemlje tako da trajektorije radio valova postanu pravci.  $(dn/dh)$  je u prirodi dovoljno malo da možemo diskusiju pojednostaviti na nivo geometrijske optike, koristeći zrake za reprezentaciju smjera širenja radio valova (Bajić i Viher, 1993).

Modificirani polumjer Zemlje nazivamo "ekvivalentni polumjer" i označavamo ga  $R'$

$$R' = \frac{R}{1 + R \frac{dn}{dh}} \quad (10)$$

Pri standardnom vertikalnom gradijentu indeksa loma  $R' = (4/3)R$ , u slučaju subrefrakcije  $R'$  je veći jer se povećava udaljenost do radio horizonta. Ovim radom upravo kritiziramo jednadžbu (10) jer  $(dn/dh)$  nije stacionarno, a uz to je i prostorno promjenjivo u horizontalnoj ravnini i, posebno, u vertikali.

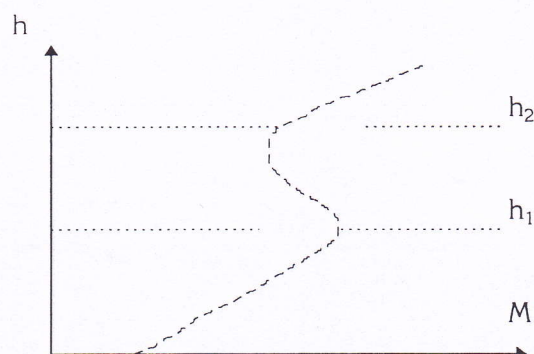
Najinteresantniji slučaj nastaje kad nastane pro-

mjena predznaka vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma jer se tada javljaju povoljni uvjeti za nastajanje radio kanala (engl. *radio duct*) duž kojega se radio valovi mogu širiti na vrlo velike udaljenosti.

Na slici 2 prikazan je slučaj nestandardnog vertikalnog gradijenta indeksa loma. Normalno, on raste s visinom kao što je slučaj od površine do visine  $h_1$ . Unutar kanala s porastom visine dolazi do povećanja indeksa loma i, posljedično, do usporavanja radio valova. Zato oni pokazuju tendenciju vraćanja prema donjoj granici kanala. Taj mehanizam dovodi do toga da je radio val "uhvaćen" (eng., *trapped*) između gornje i donje granice kanala i unutar njega može prevaliti velike udaljenosti. Ova situacija je dobrodošla za ostvarivanje radio veze na velike udaljenosti i za mjere elektroničke podrške kada je potrebno iz aviona otkriti protivničke radare na velikim udaljenostima. Ta ista situacija je nepovoljna kod praćenja ciljeva u zraku zemaljskim radarima jer se dobivaju krivi podaci o udaljenosti i, posebno, visini cilja! Za otkrivanje i prikaz položaja radio kanala povoljnije je promatrati vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma jer se kod njega kanal javlja kod nultih i negativnih iznosa.

U tablici 1 (Hitney i sur., 1985) prikazane su (dоговорne) granične vrijednosti za ova četiri karakteristična slučaja.

Maksimalni kut  $\phi_0$  (vidi sl. 1 i jedn. (7)) na kojem će još uvijek doći do hvatanja zrake možemo izračunati iz (7) postavljanjem uvjeta da počinje zakrivljenje zrake prema tlu,  $\phi_h = 0$ .



Slika 2. Primjer pojave radio kanala na visini između  $h_1$  i  $h_2$ .

Figure 2. An example of a radio duct phenomenon between heights  $h_1$  and  $h_2$ .

$$(\Phi_0)_{max} = \sqrt{2(M_0 - M_{hl}) \cdot 10^{-6}} \quad (11)$$

$\phi_0$  je kut zrake u odnosu na lokalnu horizontalu na mjestu emitiranja, a  $M_0$  i  $M_{hl}$  su modificirani indeksi loma pri tlu (na mjestu emitiranja) i na visini  $h_l$  (vidi sl. 2). Praktično taj kut iznosi nekoliko desetinki stupnja, a to su upravo kutevi pod kojima u kanal dolaze zrake s udaljenih izvora, i na taj se način znatno povećava udaljenost koju može doseći zraka iz dalekog izvora.

Meteorološki, povoljni uvjeti za nastajanje radio kanala u prizemnom sloju nastaju u tri slučaja:

a) hlađenje vlažnog prizemnog sloja u vedrim noćima. Dolazi to temperaturne inverzije i naglog pada vlažnosti zraka s visinom. Javlja se često ljeti i zahvaća veće površine.

b) prolaskom toplog i suhog zraka iznad hladne površine vode. Zrak se hladi u najdonjem sloju i istovremeno se puni vlagom. Ovakvi slučajevi javljaju se često iznad voda južnog Sredozemnog mora, zahvaljujući toplim i suhim južnim vjetrovima nastalim iznad područja Afrike, a mogu potrajati i nekoliko dana. Javljali su se slučajevi da se na zaslونima radara vidio odraz tla s udaljenosti 800 km, a radio horizont u uvjetima standardne refrakcije bio bi na samo 20 km (Battan, 1973.).

c) dovođenje hladnog i vlažnog zraka u najniže slojeve troposfere silaznim strujanjima u olujnim oblacima, cumulonimbusima. Trajanje ove pojave ovisi o životnom vijeku cumulonimbusa i rijetko je duže od jednog sata.

Slučajevi a), b) i c) su zanimljivi za zemaljske radare. Jednadžba (1) pokazuje kako povoljni uvjeti za naglu promjenu indeksa loma nastaju na svakoj naglijoj promjeni vlažnosti i temperature po visini. U troposferi je to čest slučaj tako da u promatranim slučajevima bilježimo velike promjene vertikalnog gradijenta indeksa loma i pojave radio kanala na visini. Pojava radio kanala na nekoj visini u troposferi zanimljiva je za potrebe avionskih radara jer su kutevi pod kojim njihove zrake upada-

ju u kanal vrlo često mali, tako da, prema (11) postoje povoljni uvjeti za hvatanje i širenje duž kanala. Poznavanje položaja i širine kanala omogućava i izbor visine za letjelice elektroničke podrške, za potrebe otkrivanja izvora i elektronskog ometanja.

## 2. ODREĐIVANJE DALJINE RADIO HORIZONTALA ZA ZADANU VISINU ANTENE

Uz pretpostavke da širenje radio valova možemo aproksimirati zrakama i uz modificiranje radijusa Zemlje tako da bi zrake ostale pravci, slijedi da površinu Zemlje prikazujemo lukom parabole, umjesto luka kružnice polumjera  $R$ , oblika:

$$z = -\frac{x^2}{2 \cdot R'} \quad (12)$$

Problem se svodi na traženje presjecišta pravca

$$z = \text{tg} \Phi \cdot x + h \quad (13)$$

i parabole (12). Kut  $\phi$  može biti vrlo koristan kod određivanja maksimalnog kuta pod kojim zraka ostaje uhvaćena u kanal, prema (11).

Kut  $\phi$  određujemo iz uvjeta da zraka mora proći kroz točku  $A(0,h)$ :

$$z - h = k \cdot x \quad (14)$$

gdje je  $k$  koeficijent smjera pravca. Uvrštavanjem (14) u (12) dobivamo kvadratnu jednadžbu kod koje nas zanima samo ono rješenje koje ima diskriminantu jednaku nuli, jer tražimo samo jedno rješenje-točku u kojoj zraka tangira površinu zemlje. Radi suglasnosti sa slikom 3 biramo rješenje s negativnim predznakom.

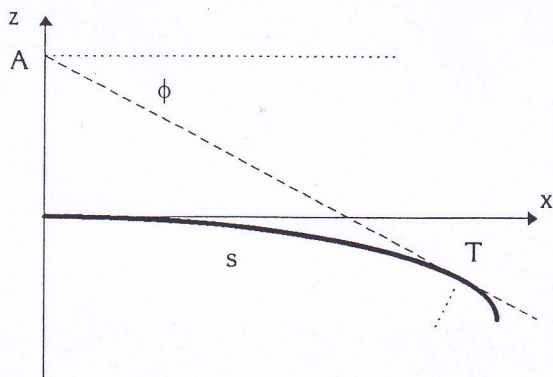
$$k = -\sqrt{\frac{2h}{R'}} = \text{tg} \Phi \Rightarrow \Phi = \text{arc} \text{tg} \left( \sqrt{\frac{2h}{R'}} \right) \quad (15)$$

Uvrštenje  $k$  iz (15) u (14) i ponovo uvrštenje u (12) vodi nas ponovo na rješavanje kvadratne jednadžbe čije rješenje daje koordinate točke  $T$ .

Tablica 1. Granične vrijednosti za karakteristične tipove refrakcija.

Table 1. Limiting values for characteristic types of refraction.

	N gradijent $N\text{km}^{-1}$	M gradijent $M\text{km}^{-1}$
kanaliziranje	-157 i manje	0 i manje
superrefrakcija	veće od -157, do -79	veće od 0, do 78
standardna refrakcija	veće od -79, do 0	veće od 78, do 157
subrefrakcija	veće od 0	veće od 157



Slika 3. Veličine za određivanje daljine radio horizonta.

Figure 3. Terms for the evaluation of distance to the radio horizon.

Promatramo samo rješenje koje daje koordinate točke desno od ishodišta, kao na slici 3, jer postoji još jedno rješenje simetrično na lijevoj strani. Koordinate točke T ovise samo o visini  $h$  i o ekvivalentnom polumjeru  $R'$ .

$$T = T(\sqrt{2 \cdot h \cdot R'} - h) \quad (16)$$

Daljinu  $s$ , mjerenu po površini Zemlje, dobivamo izračunavanjem duljine luka parabole od ishodišta do točke T:

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx \quad (17)$$

Iz (12) slijedi:

$$\frac{dz}{dx} = -\frac{x}{R'} \quad (18)$$

što uvrstimo u (17) i integriramo kako bi dobili udaljenost  $s$ :

$$s = \int_0^{\sqrt{2hR'}} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R'}\right)^2} dx \quad (19)$$

U jednostavnom slučaju, možemo razmatrati  $R'$  kao konstantno i pratiti kako se povećava daljina radio horizonta  $s$  porastom visine  $h$ , pretpostavimo  $R' = (4/3)R$  i koristimo (19).

Jednadžbu (19) možemo rješavati i po segmentima ako poznajemo prostornu razdiobu  $R'$  koja je funkcija vertikalnog gradijenta indeksa loma. U ovisnosti o gustoći balonskih sondiranja dijelimo područje u niz Voronojevih ćelija u kojima pret-

postavljamo stratificiran  $R'$ . Problem na taj način ostaje linearan samo podijeljen u veliki broj segmenata.

Drugi pristup bio bi u određivanju prostorne razdiobe  $R'(s, h)$ , pomoću odgovarajuće metode prostorne interpolacije - ali bi time i jednadžba (19) dobila znatno složeniji oblik.

U oba slučaja potrebni su georeferencirani vertikalni profili indeksa loma dobiveni ovim ili nekim sličnim postupkom.

### 3. PRIMJER ANALIZE VERTIKALNOG PROFILA INDEKSA LOMA

Ulazne veličine za jednadžbu (1) dolaze iz međunarodne razmjene aerosondažnih mjerenja. Trenutno je pokriveno područje koje je prikazano na slici 4. Oko aerosondažne postaje ucrtan je krug od 150 km u kojem smatramo sondažu reprezentativnom.

Puno je bolje određivanje područja reprezentativnosti pomoću Voronojevih ćelija. Praktično je što su one podržane boljim GIS (geografski informacijski sustav) programima. Broj sondiranja u jednom danu razlikuje se od postaje do postaje. Jedne sondiraju svakih šest sati, druge svakih dvanaest sati, a neke samo jednom dnevno. Ponekad čak i nemamo podatka o sondiranju. Poznavanjem lokacija postaja čije podatke imamo možemo svaki puta izračunati Voronojeve ćelije za konkretni slučaj. Primjena Voronojevih ćelija rješava prob-

Tablica 2. Odnos visine  $h$  i daljine radio horizonta  $s$  u slučaju standardnog iznosa vertikalnog gradijenta indeksa loma

Table 2. The relation between height ( $h$ ) and the radio horizon ( $s$ ) for a standard vertical gradient of the refraction index

visina $h$ (m)	daljina radio horizonta $s$ (km)
0	0
1000	130,8
2000	184,9
3000	226,5
4000	261,6
5000	292,5
6000	320,4
7000	346,1
8000	370,0
9000	392,4
10000	413,7
11000	433,9
12000	453,2

lem preklapanja područja reprezentativnosti sondaža na slici 4. Može se dogoditi da maksimalni polumjeri Voronijevih ćelija premaše udaljenost od 150 km, ovisno o rasporedu aerosondažnih postaja. I u tom slučaju bolje se orijentirati prema podacima mjerenja bliže postaje.

U tablici 3 imamo primjer računanja modificiranog indeksa loma ( $n$ ) i vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma ( $n'$ ) uz ulazne podatke dobivene iz balonske sondaže iz postaje Brindisi, Italija.

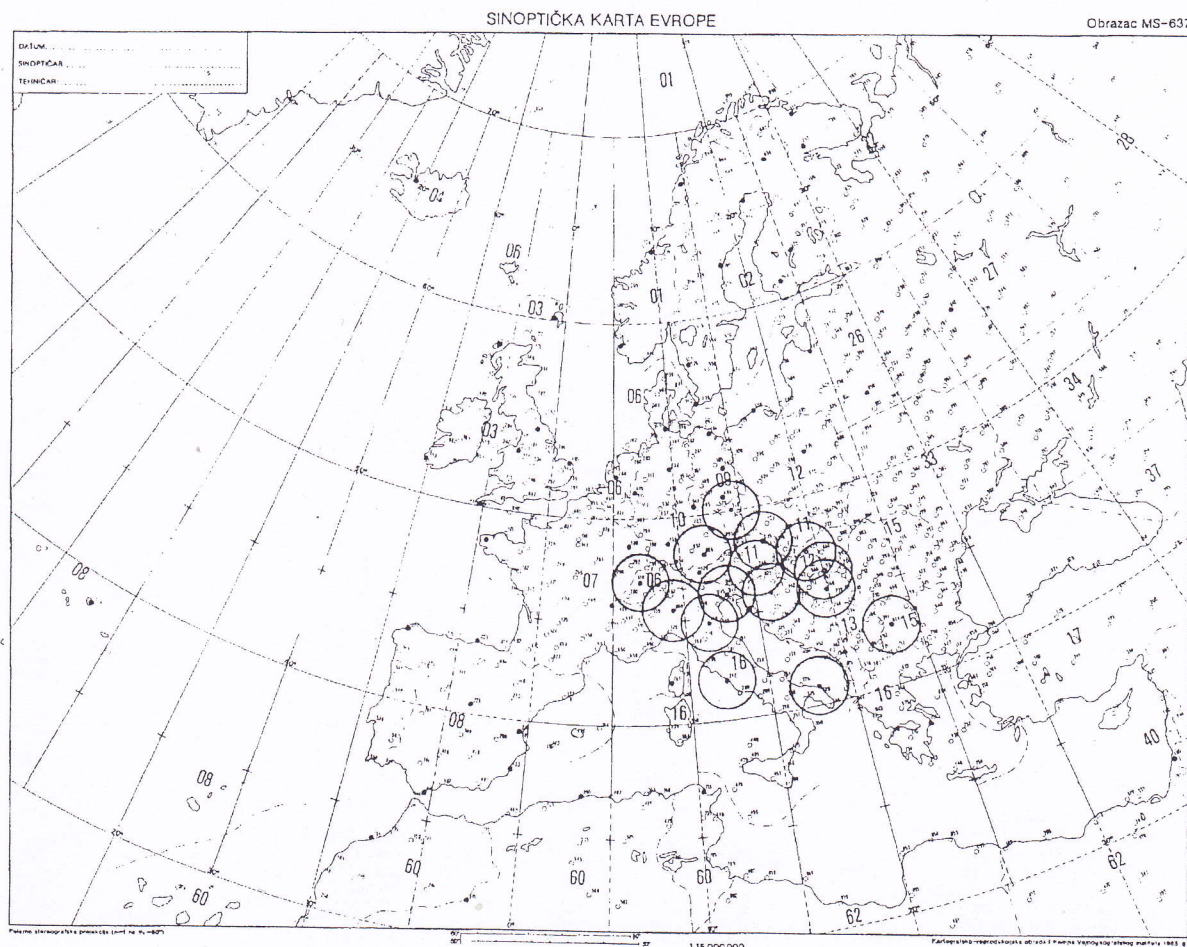
U tablici 3 vidimo pojavu dva izražena kanala, niži, između 110 i 300 m, a viši između 620 i 770 m. U prikazu rezultata označeni su oznakom K. Oba kanala nastaju zbog anomalija u vertikalnim gradijentima temperature i vlažnosti. Na ovom

primjeru jasno vidimo kako  $dn/dh$  jako odstupa od standardne vrijednosti  $117 \text{ Mkm}^{-1}$ .

Visina koju dosežu izračunavanja indeksa loma ovise o maksimalnoj visini koju može postići balon, te o minimalnoj temperaturi rosišta koju senzor na radio sondi može izmjeriti. Na dijagramu se jasno vide položaji i dimenzije kanala. Između izračunatih točaka je modificirani indeks loma linearno interpoliran.

#### 4. ZAKLJUČAK

Rezultati računanja modificiranog indeksa loma i vertikalnog gradijenta indeksa loma pokazuju znatna odstupanja od standardnih vrijednosti pre-



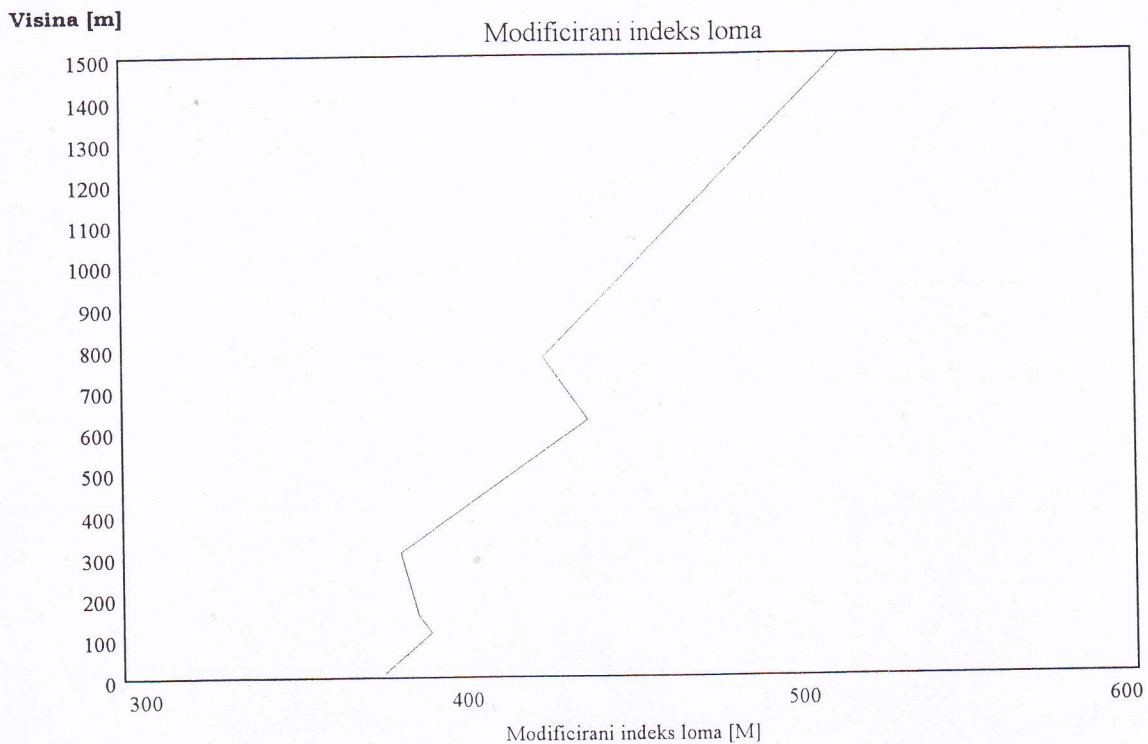
Slika 4. Područje koje je, za sada, obuhvaćeno računanjem modificiranog indeksa loma. Krugovima polumjera 150 km je označeno područje za koje smatramo sondažu reprezentativnom. Crnim točkama su označene postaje čije podatke primamo preko međunarodne razmjene i one se mogu naknadno uključiti u razmatranja.

Figure 4. The areas currently included in modified refraction index computing. Circles of 150 km in radius represent the areas where probing is considered as representative. The black points mark the stations from which data were received through international exchange and all of which could be included in the future.



Slika 5. Voronojeve ćelije u slučaju kad bi imali podatke sa svih 15 postaja čije podatke primamo preko međunarodne razmjene.

Figure 5. The Voronoi cells as they would appear if we had data from all 15 stations (collected through international exchange).



Slika 6. Grafički prikaz promjene modificiranog indeksa loma s visinom prema podacima iz tablice 2.

Figure 6. Change of the modified refraction index with height graph, according to the data in table 2.

Tablica 3. Tekstovni izlaz iz programa za računanje modificiranog indeksa loma i vertikalnog gradijenta indeksa loma za Brindisi, Italija, 19. rujna 1995. u 06:00 UTC.

Table 3. The textual computer output of the modified refraction index and the vertical gradient of the modified refraction index for Brindisi, Italy, 19 September, 06:00 UTC

Datum: 19. rujna 1995. Vrijeme: 6 h 0 min UTC = 8 h 0 min L (Hrvatska)

Geografska lokacija: N=40.650° E=17.950° nadm.vis.=10 m

nadm. vis. (m)	tlak (hPa)	temp. (°C)	temp. ros. (°C)	brzina vjetra (ms <sup>-1</sup> )	smjer vjetra (°)	tlak vod.p. (hPa)	mod. ind.l. (M)	dM/dh (Mkm <sup>-1</sup> )	kanal
10	1017,0	19,9	18,4	0	0	23,1	377	141	
110	1005,0	20,7	18,8	---	---	23,7	391	-106	K1
150	1000,0	20,7	17,5	4	115	21,6	387	-31	K1
300	984,0	20,3	13,3	---	---	16,0	382	176	K1
620	947,0	18,3	15,7	---	---	19,0	438	-90	K2
770	931,0	19,1	9,1	---	---	11,8	425	114	K2
820	925,0	18,9	8,9	8	145	11,6	430	123	
1540	850,0	15,7	6,7	8	185	9,9	519	-110	
2040	802,0	14,5	2,5	5	175	7,3	574	139	
3160	700,0	6,3	2,4	10	280	7,3	729	130	
3730	654,0	2,1	-0,1	---	---	6,1	803	120	
4640	583,0	-4,7	-12,7	---	---	2,4	912	136	
5070	552,0	-8,1	-15,1	---	---	2,0	971	127	
5590	516,0	-10,1	-26,1	---	---	0,9	1037	147	
5820	500,0	-12,1	-23,1	11	295	1,1	1071	141	
6160	479,0	-14,9	-24,9	---	---	1,0	1119	139	
7390	406,0	-22,3	-41,3	---	---	0,3	1290	141	
7490	400,0	-23,1	-42,1	13	280	0,3	1304	145	
8860	331,0	-32,5	-37,4	19	280	0,4	1502	144	
9530	300,0	-37,9	-42,9	27	275	0,3	1598	---	

ma kojima se rade modeli širenja radio valova u atmosferi i podešavaju izlazi elektroničkih uređaja (npr. zasloni radara). Opisani postupak daje georeferencirane vertikalne profile, za koje pretpostavljamo kako vrijede na području jedne Voronojeve ćelije. Unutar ćelije pretpostavimo sferno stratificiran gradijent indeksa loma od jedne do druge visine na kojoj dobivamo podatke s aerosonde. Za svaki sloj računamo  $R'$  koji uvrštavamo u (12), (15) i, eventualno, (16) i (19). Ovaj model širenja mikrovalnog zračenja u atmosferi, bez obzira na jednostavnost zbog aproksimacije širenja zrakama, podržava pojavu radio kanala usporedbom rezultata jednadžbi (11) i (15).

Izračunavanjem vertikalnog profila i prostorne razdiobe vertikalnog gradijenta indeksa loma dobivaju se elementi za poboljšanje modela potencijalne radarske vidljivosti (Bajić, Viher 1993). Pored toga, vertikalni profili gradijenta indeksa loma omogućavaju praktično iskorištavanje anomalija

za aktivno i pasivno radarsko izviđanje, upozoravanje na krivo prikazivanje daljine i visine ciljeva na zemaljskim radarima i izbor visine leta vlastitih letjelica kako bi one ostale što duže sakrivene od protivničkih radara.

## 5. LITERATURA

- Battan L.J., 1959, 1973: Radar Meteorology, *The University of Chicago Press*, Chicago, 161 pp.
- Bajić M. i M. Viher, 1993: Jednostavni statistički model potencijalne vidljivosti i GIS za radare, *Bilten Savjeta za daljinska istraživanja i fotointerpretaciju HAZU*, Vol. 12, 19-36.
- Hitney H.V., J.H. Richter, R.A. Pappert, K.D. Anderson and G.B. Baumgartner, 1985: Tropospheric radio Propagation Assessment, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No. 2, February 1985, 265-283.