

**POJAVE NESTANDARDNE REFRAKCIJE RADIOVALOVA U  
VIŠEGODIŠNJEM NIZU SONDAŽA AEROLOŠKE POSTAJE  
ZAGREB-MAKSIMIR**

**Non-standrad radio-wave refraction phenomena in the perennial time  
series of the aerological station Zagreb-Maksimir**

MLADEN VIHER

Ministarstvo obrane Republike Hrvatske  
Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava, PP 252, 10002 Zagreb  
*mladen.viher@morh.hr*

*Prihvaćeno 2. svibnja 2006, u konačnom obliku 29. siječnja 2007.*

**Sažetak:** Korištenjem podataka redovitih balonskih mjerenja na aerološkoj postaji Zagreb-Maksimir (WMO# 14240) dobiven je sedmogodišnji kontinuirani niz vertikalnih profila modificiranog indeksa loma radiovalova u troposferi. Ti profili omogućili su detektiranje pojava nestandardne refrakcije radiovalova. U radu su izračunati vertikalni profili čestine pojava radiokanala, superrefrakcije i subrefrakcije te su određene karakteristične visine na kojima se pojedine vrste nestandardne refrakcije najčešće javljaju. Vremenski nizovi pokazuju godišnji hod pojava nestandardne refrakcije s maksimalnom čestinom ljeti, a minimalnom zimi i u prvoj polovici proljeća.

**Cljučne riječi:** refrakcija radio valova, nestandardna refrakcija, (refrakcijska anomalija, anaprop), modificirani indeks loma

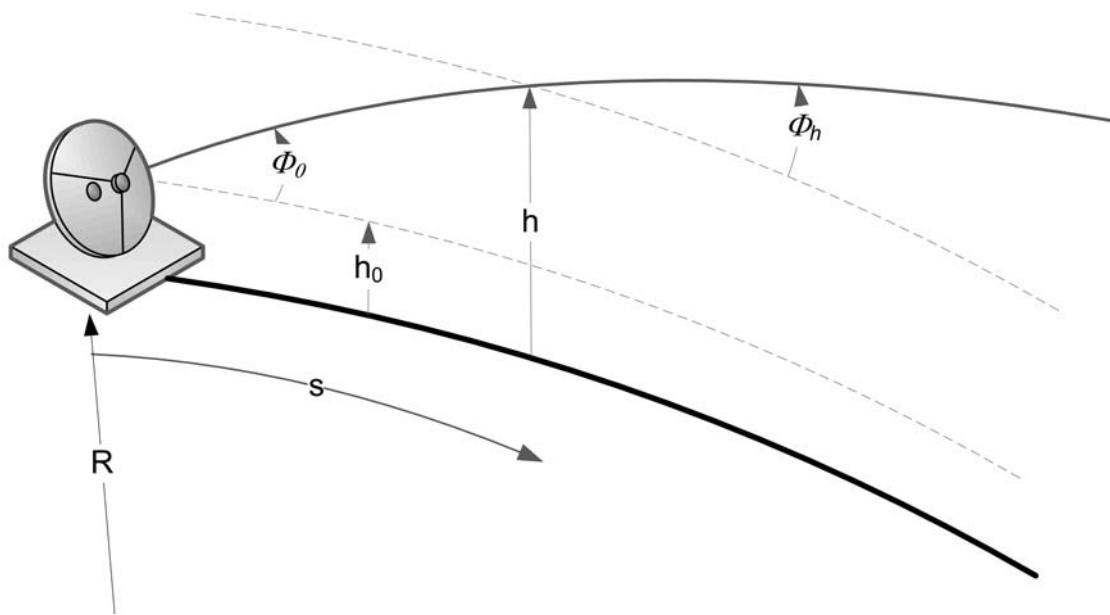
**Abstract:** Using regular balloon data at the aerological station Zagreb-Maksimir (WMO# 14240) a continuous, seven years long record containing modified refraction index vertical profiles in the troposphere was produced. These profiles enable detection of the non-standard radio wave refraction phenomena. The vertical profiles of radio duct, superrefraction and subrefraction phenomena occurrences were obtained and the characteristic heights for all non-standard phenomena were determined. The time series show an annual variation with a maximum frequency during summer and minimum during winter and the first half of spring.

**Key words:** radio refraction, anaprop, modified refraction index

## 1. UVOD

Problem refrakcije radiovalova u atmosferi teorijski je opisan još u radovima Appletona dvadesetih i tridesetih godina (Battan, 1973). U današnje vrijeme problematika modeliranja širenja radiovalova u atmosferi dobiva na značenju zbog sve većeg broja novih područja primjene, kao što je sve gušća mreža radara, nagli porast prometa u bežičnim telekomunikacijama, zatim satelitska radionavigacija te novi uvjeti korištenja elektroničkih uređaja u vojsci, koja je sve češće u interventnoj ulozi u raz-

ličitim dijelovima svijeta gdje vladaju bitno različiti uvjeti u atmosferi. Za istraživanje refrakcije radiovalova u praksi se rabe specijalna mjerenja, koja su, zbog skupoće i tehničkih zahtjeva, rijetka i omogućuju kratkotrajne nizove mjerenja. Da bi se refrakcija radiovalova, a posebice pojave nestandardne refrakcije (drugi naziv: *refrakcijska anomalija* ili kraće *anaprop*) mogla istraživati, potrebni su kontinuirani dugi nizovi podataka. U ovom je radu jedan takav niz, u trajanju od sedam godina, dobiven iz redovitih balonskih sondažnih po-



Slika 1. Veličine u Appletonovoj jednadžbi (Battan, 1973) za širenje radio-valova u atmosferi; srednji polu-mjer Zemlje  $R = 6371$  km, nadmorska visina  $h$ , udaljenost duž površine  $s$ ,  $\Phi_0$  i  $\Phi_h$  su kutovi između trajektorije i kružnice lokalne zakrivljenosti polumjera  $(R + h)$ , a  $n_0$  i  $n_h$  su iznosi indeksa loma za radio valove na površini, odnosno visini  $h$ .

Figure 1. Terms in the Appleton equation (Battan, 1973) for radio wave propagation in the atmosphere; Earth's radius  $R = 6371$  km, height  $h$ , surface distance  $s$ ,  $\Phi_0$  and  $\Phi_h$  are the angles between the trajectory and the local curvature  $(R + h)$  and  $n_0$  and  $n_h$  are the radio-wave refraction indices at surface and height  $h$ , respectively.

dataka aerološke postaje Zagreb-Maksimir (nadmorska je visina postaje Zagreb-Maksimir 123 m). Rad predstavlja nastavak prijašnjih istraživanja refrakcije radio valova u stvarnim uvjetima (Viher, 1995, 2006) korištenjem složenijih i suvremenijih modela (Hitney i dr., 1985; Patterson i dr., 1994). Periodičnost pojava nestandardnih refrakcija, kao i karakteristične visine na kojima se one javljaju, iskoristit će se u budućim istraživanjima, koja će se usredotočiti na proučavanje atmosferske dinamike koja uzrokuje promjene vertikalnih profila temperature, tlaka i vlažnosti zraka koje, u konačnici, uzrokuju pojavljivanje nestandardnih refrakcija radiovalova. S tim saznanjima i uz pomoć prognostičkih atmosferskih modela bit će moguće prognozirati pojave nestandardne refrakcije radiovalova.

Trajektorije radiovalova u atmosferi određene su vertikalnim gradijentom indeksa loma za radiovalove. Uz pretpostavku sferne stratifikacije indeksa loma u atmosferi i aproksimacije Zemlje kuglom promjera  $R$  (sl. 1), izvodi se Appletonova jednadžba trajektorije radiovalova u atmosferi čije je rješenje (Battan, 1973):

$$\frac{\phi_h^2}{2} - \frac{\phi_0^2}{2} = \frac{h - h_0}{R} + n - n_0 = \left( \frac{h}{R} + n \right) - \left( \frac{h_0}{R} + n_0 \right) \quad (1)$$

Trajektorija širenja radiovalova u atmosferi opisana je kutovima  $\Phi_0$  i  $\Phi_h$  pod kojima ona presijeca lokalnu zakrivljenost  $R + h$  (sl. 1). Indeks loma u jednadžbi (1) nije praktična jedinica jer se kod nje mijenja tek peta-šesta decimala. Zbog toga se koriste tzv. »*N-jedinice*«, zapravo značajne znamenke od  $(n-1)$ :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2)$$

$N$  i  $n$  bezdimenzionalne su fizikalne veličine, ali se u literaturi  $N$  često izražava u tzv. »*N-jedinicama*« (engl. *N units*).  $N$  jest funkcija tlaka, temperature i vlažnosti koja se u širokom temperaturnom rasponu (od  $+40^\circ\text{C}$  do  $-60^\circ\text{C}$ ) može izraziti empirijskom formulom (Patterson i dr., 1994):

$$N = \frac{77.6 [K \cdot Pa^{-1}] \cdot p}{T} + \frac{e'_s \cdot 3.73 \cdot 10^5 [K^2 Pa^{-1}]}{T^2}$$

$$e'_s = \frac{rh \cdot 6.105 \cdot \exp(x)}{100},$$

$$x = 25.22 \frac{T - 273.15 [K]}{T} - 5.31 \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right)$$

U jednadžbi (3)  $T_0 = 273.15$  K,  $T$  jest termodinamička temperatura zraka,  $p$  tlak u hPa i  $rh$  relativna vlažnost izražena u postocima (0–100) (URL: <http://www.faqs.org/faqs/meteorology/temp-dewpoint/>).

Relativna vlažnost  $rh = (e/e_s) \cdot 100$ , pri čemu su:  $e$  tlak vodene pare,  $e_s$  tlak zasićene vodene pare (oba u hPa),  $T_d$  temperatura rosišta u K,  $l_v = 2.5 \cdot 10^6$  J kg<sup>-1</sup> latentna toplina isparavanja, i  $R_v = 461.5$  J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup> plinska konstanta vodene pare.

$$e = e_{s0} \cdot \exp \left[ \frac{l_v}{R_v} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_d} \right) \right]$$

$$e_s = e_{s0} \cdot \exp \left[ \frac{l_v}{R_v} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Temperatura, temperatura rosišta i tlak u jednadžbama (3) i (4) dobivaju se iz redovitih balonskih aeroloških mjerenja (npr. Viher, 1995).

$N$ -jedinice mogu se koristiti samo za opis refrakcije na razini mora jer, kako raste visina (sl. 2) smanjuje se lokalna zakrivljenost  $1/(R+h)$  zbog čega uvodimo novu veličinu, nazvanu *modificirani indeks loma*, koja je, poput  $N$  u jednadžbi (2), bezdimenzionalna veličina. To su također samo značajne znamenke, u ovom slučaju modificiranog indeksa loma, u literaturi se nazivaju  $M$ -jedinice (engl. *M units*):

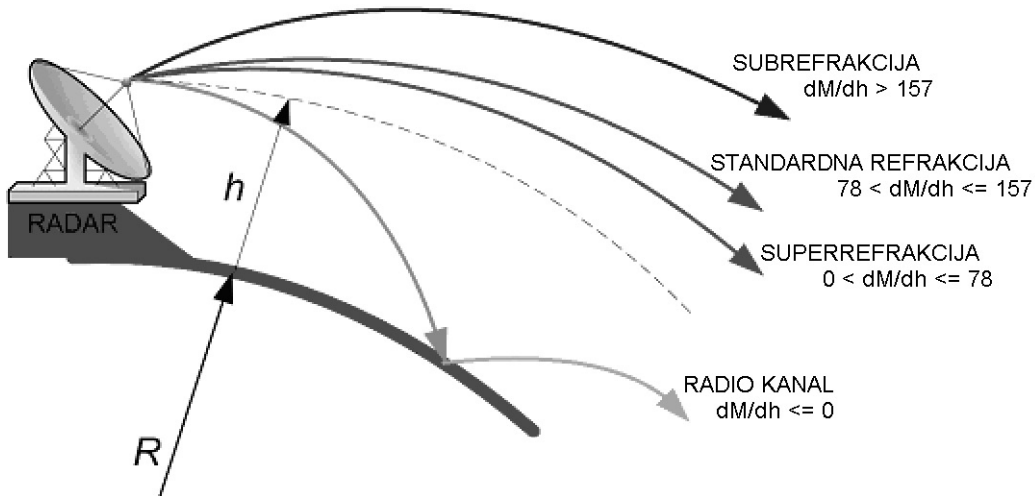
$$M = \left[ \frac{h}{R} + (n-1) \right] \cdot 10^6 =$$

$$= N + 0.157 [m^{-1}] \cdot h$$

$$(10^{-6} / R [m] = 0.157 [m^{-1}])$$

Uz modificirani indeks loma, definiran u jednadžbi (5), možemo rješenje Appletonove jednadžbe (1) pisati u kompaktnom obliku:

$$\frac{\phi_h^2}{2} - \frac{\phi_0^2}{2} = (M - M_0) \cdot 10^6$$



Slika 2. Vrste refrakcije i pripadajući iznosi vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma u  $M$ -jedinicama km<sup>-1</sup>. Pojave subrefrakcije, superrefrakcije i radio kanala zajednički se nazivaju nestandardna refrakcija, refrakcijska anomalija, ili kraće *anaprop*.

Figure 2. Refraction types and corresponding values of the vertical gradient of the modified refraction indices expressed in “*M units*” km<sup>-1</sup>. Subrefractions, superrefractions and radio ducts phenomena are considered non-standard refraction (anomalous refraction or *anaprop*).

Prema jednadžbi (6) trajektorije radiovalova u atmosferi određene su gradijentom modificiranog indeksa loma radiovalova  $dM/dh$  i zbog toga ta fizikalna veličina ima središnje mjesto u ovom istraživanju. Iz praktičnih razloga, budući da je vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma u atmosferi po iznosu malen, obično se izražava u M-jedinicama po kilometru visine (M-jedinice  $\text{km}^{-1}$ ).

## 2. METODE

U ovom radu oslonili smo se u potpunosti na redovita aerosondažna mjerenja, što ima mnoge prednosti. Na prvom je mjestu mogućnost dobivanja dugih i neprekinutih nizova mjerenja. Radi usporedbe podataka s većeg broja aerosondažnih postaja, vrlo je važno i to što su mjerenja provedena po postupcima standardiziranima po WMO.

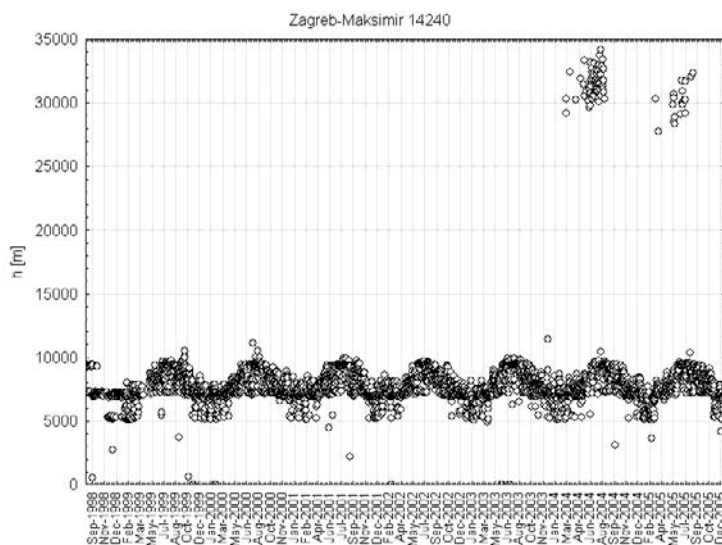
Nedostatak standardnih aerosondažnih mjerenja u odnosu na specijalna mjerenja jest manja točnost. Tehnički razlog za to jesu inertnosti termistora i *humicap* senzora na sondama, izlaganje Sunčevu zračenju i zaleđivanje senzora. Tehničke značajke senzora dobro su obrađene u literaturi (npr. Leiterer i dr., 2002), što se može iskoristiti za procjenu točnosti izračunavanja modificiranog indeksa loma. Za pro-

cjenu apsolutne pogreške jednadžbe (3) računamo sumu parcijalnih derivacija po visini, tlaku, relativnoj vlažnosti i temperaturi:

$$\Delta M \leq 0.157 \left[ m^{-1} \right] \cdot \Delta h + \frac{77.6 \left[ K Pa^{-1} \right]}{T} \Delta p + \frac{3.73 \cdot 10^5 \left[ K^2 Pa^{-1} \right] \Delta e'_s - 77.6 \left[ K Pa^{-1} \right] p \cdot \Delta T}{T^2} - \frac{7.46 \cdot 10^5 \left[ K^2 Pa^{-1} \right] \cdot e'_s \cdot \Delta T}{T^3} \quad (7)$$

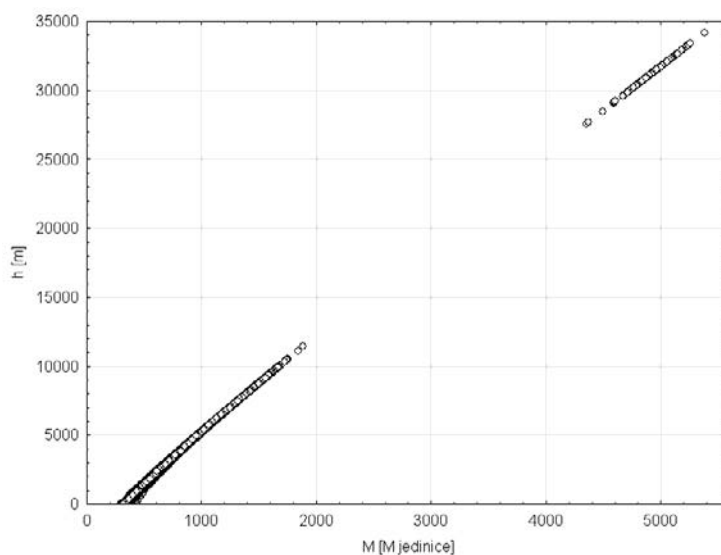
Uvrstimo li tipične površinske uvjete:  $p=1013$  hPa,  $T=290$  K,  $e'_s=10$  hPa i apsolutne pogreške senzora prema tehničkim podacima za sonde (URL: <http://www.metoffice.com/research/interproj/radiosonde/reports/>);  $\Delta h=5$  m,  $\Delta T=0.5$  K,  $\Delta p=0.4$  hPa,  $\Delta e'_s=1$  hPa – dobivamo  $\Delta M$  manje od 4.8 M-jedinica, što u standardnim uvjetima ( $M=340$  M-jedinica) daje relativnu pogrešku od oko 1.4%, što je sasvim prihvatljivo.

U ovom radu korištena je arhiva aerosondažnih podataka NOAA RAOB (RAwinsonde OBservation) (URL: <http://raob.fsl.noaa.gov>), koja za Zagreb-Maksimir sadrži podatke od 14. kolovoza 1998. godine. Budući da niz mjerenja u 1998. godini sadrži samo standardne

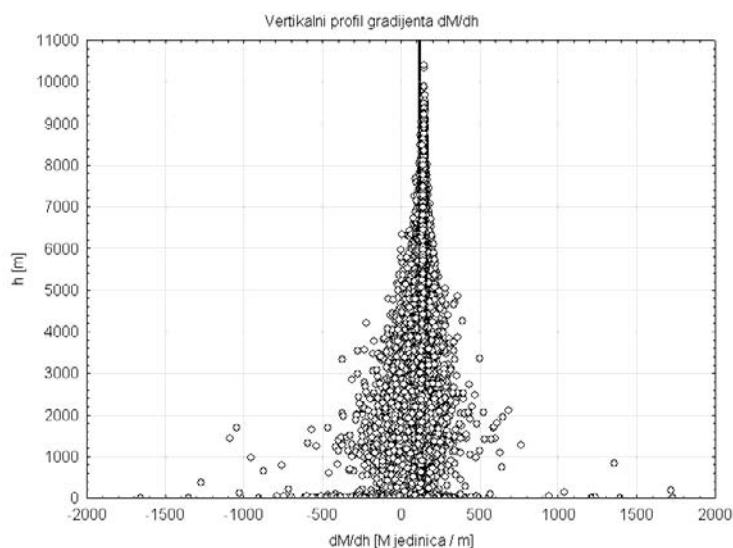


Slika 3. Maksimalne visine iznad tla dosegnute u svakoj od 4995 aerosondaža. U većini slučajeva radi se o troposferskim visinama. Nadmorska je visina aerološke postaje Zagreb-Maksimir 123 m, a  $h$  predstavlja visinu iznad tla.

Figure 3. Maximal height over ground reached by any of the 4995 soundings. In most cases, these are tropospheric heights. The aerological Zagreb-Maksimir station lies at 123 m ASL and  $h$  is its height over ground.



Slika 4. Vertikalni profil promjene modificiranog indeksa loma  $M$  s visinom.  $h$  predstavlja visinu iznad tla.  
 Figure 4. Vertical profile of the modified refraction index  $M$  with height  $h$  (above ground).



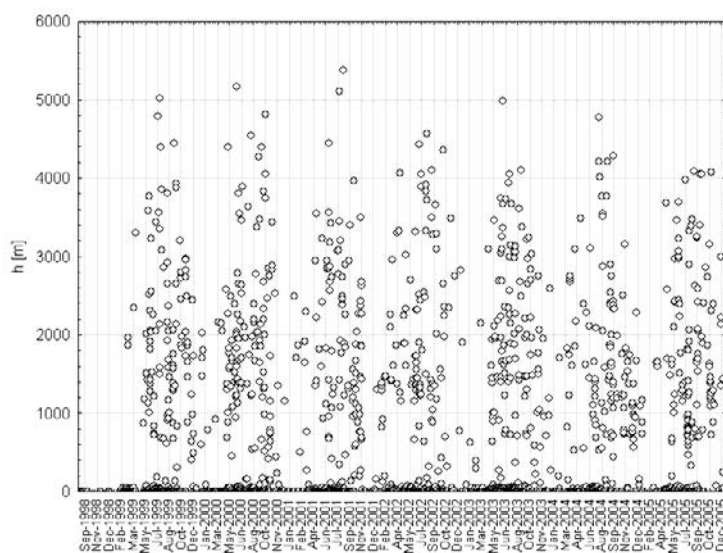
Slika 5. Stvarne vrijednosti gradijenta modificiranog indeksa loma s visinom. Označena je standardna vrijednost 117 M-jedinica  $\text{km}^{-1}$ .  $h$  označava visinu iznad tla.

Figure 5. Actual modified refraction index gradient values as a function of height  $h$  (above ground). The standard value of 117 “M units”  $\text{km}^{-1}$  is outlined.

plohe, u radu su korišteni podaci od 1. siječnja 1999. do 31. prosinca 2004. godine, koji sadrže standardne i značajne plohe. Ukupno je obrađeno 4995 sondaža (dvije na dan) s 93899 podataka. Podaci su preuzimani u tekstnom formatu FSL Rawinsonde, a modificirani indeksi loma dobiveni su uz pomoć jednadžbi (4) i (3) vlastitom aplikacijom MODRI9 (od MODi-fied Refraction Index 9.0).

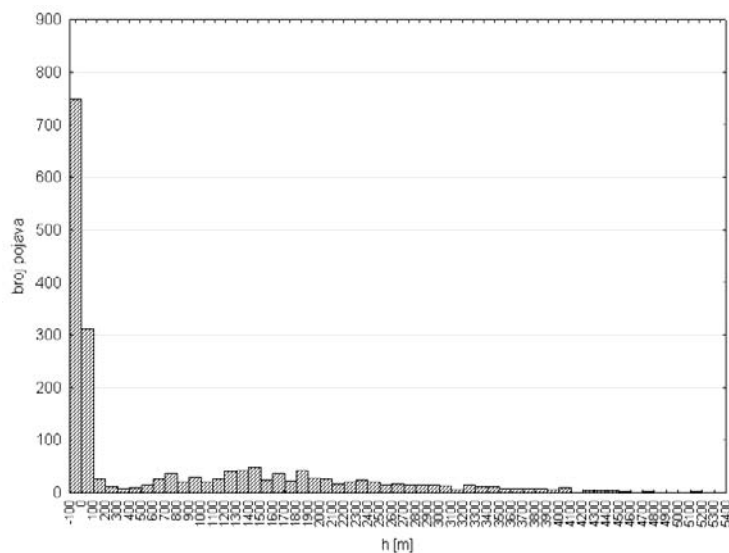
### 3. REZULTATI

Kontinuirani višegodišnji nizovi podataka o refrakciji pružaju mogućnost uvida u karakteristične visine na kojima se pojava može očekivati. Na slici 3 prikazane su najveće visine koje su sonde dosegle za cijeli niz mjerenja. Visina mjerenja uvjetovana je tehničkim razlozima, od kojih su najvažniji kvaliteta balona



Slika 6. Vremenski niz pojava radio kanala po visini (iznad tla).

Figure 6. Time series of radio ducts and heights (above ground) of occurrences.

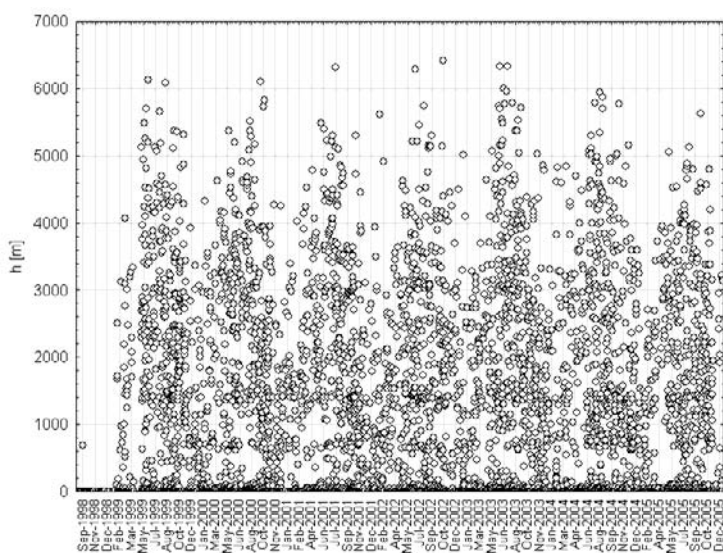


Slika 7. Razdioba čestina pojava radio kanala po visini iznad tla,  $h$ . Stupac (-100 do 0) m visine nad tlom odnosi se na pojave kanala na samoj površini.

Figure 7. Frequency distribution of radio duct occurrences by height above surface,  $h$ . The bar (-100–0) m height above ground represents radio ducts at the surface.

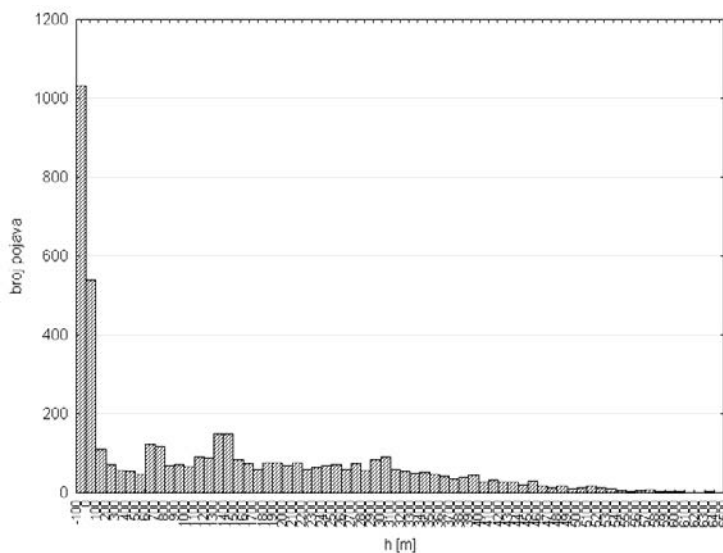
te težina sonde i baterija koje napajaju sondu. Niz podataka aerosondažne postaje Zagreb-Maksimir odnosi se velikom većinom na visine niže od 10 km, zbog čega je i opis pojava nestandardnih refrakcija radiovalova u ovom radu ograničen na troposferski sloj atmosfere. Dvije manje skupine mjerenja, u 2004. i 2005.

godini, dosežu visoko u stratosferu, do visine od 34 km (sl. 3). U te dvije stratosferske skupine podataka nisu zabilježene pojave nestandardne refrakcije. To nikako ne znači da su pojave nestandardne refrakcije vezane isključivo za troposferu. U prijašnjim radovima (Viher; 1995, 2006), u kojima su korišteni podaci



Slika 8. Vremenski niz pojava superrefrakcija s visinom (iznad tla).

Figure 8. Time series of superrefraction occurrences with height above ground.



Slika 9. Razdioba čestina pojava superrefrakcija po visini iznad tla,  $h$ . Stupac (-100 do 0) m visine nad tlom odnosi se na pojave kanala na samoj površini.

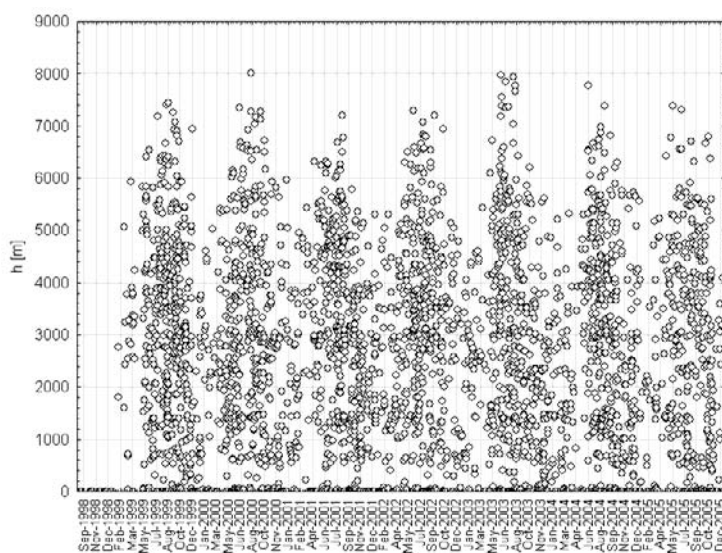
Figure 9. Frequency distribution of superrefractions by height above ground,  $h$ . The bar (-100–0) m height above ground represents radio ducts at the surface.

većeg broja postaja, zabilježene su sve tri vrste nestandardne refrakcije i u stratosferi, iako s malom učestalosti.

Promatrajući uglavnom linearnu promjenu mjenjenog modificiranog indeksa loma s visinom  $M(h)$  na slici 4, zapažamo pravilnost koja može dovesti do pogrešnog zaključka o pravilnosti i

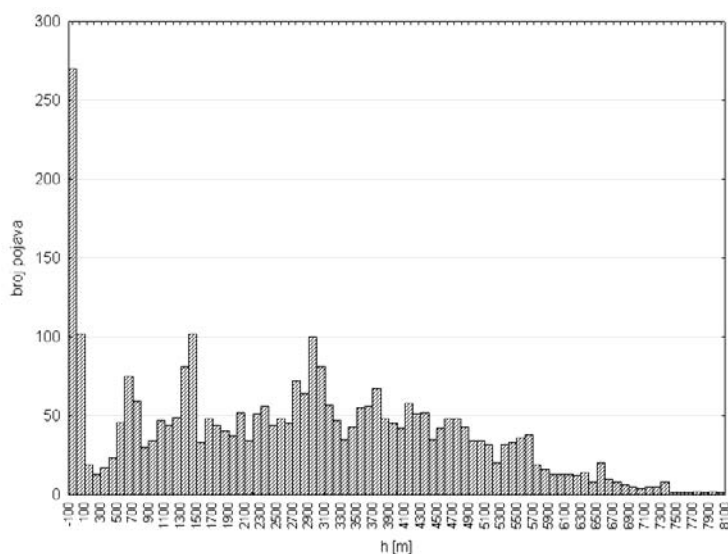
predvidivosti te pojave. Oslanjajući se na profil  $M(h)$ , Međunarodna telekomunikacijska unija preporučila je jednostavne eksponencijalne modele profila  $M(h)$  koji se koriste pri projektiranju elektroničkih sustava veza i radara (ITU, 2003).

Međutim, trajektorije radiovalova u atmosferi određuje gradijent modificiranog indeksa lo-



Slika 10. Vremenski niz pojava subrefrakcija s visinom (iznad tla).

Figure 10. Time series of subrefraction occurrences with height above ground.



Slika 11. Razdioba čestina pojava subrefrakcija po visini iznad tla,  $h$ . Stupac (-100 do 0) m visine nad tlom odnosi se na pojave kanala na samoj površini.

Figure 11. Frequency distribution of subrefractions by height above ground,  $h$ . The bar (-100–0) m height above ground represents radio ducts at the surface.

ma  $dM/dh$ , što je implicitno izraženo u Appletonovoj jednadžbi (1). Taj je gradijent funkcija temperature, vlažnosti i tlaka zraka, koje su ponekad podložne naglim promjenama s visinom. To znači da promjene  $M(h)$  čak i ne moraju biti velike po apsolutnom iznosu, ali mogu dovesti do znatnijih vrijednosti gradijenta modificiranog indeksa loma  $dM/dh$  ako se javljaju naglo. To zapažanje ilustrirano je na slici 5, koja prikazuje stvarne iznose gradijenta mo-

dificiranog indeksa loma  $[M(h_2)-M(h_1)]/(h_2-h_1)$ , pri čemu je  $M(h_i)$  iznos modificiranog indeksa loma na visini  $h_i$  iznad tla i  $h_2 > h_1$ . Na slici je istaknuta standardna vrijednost gradijenta od  $117 \text{ M-jedinica km}^{-1}$ .

Za razliku od slike 4, koja na prvi pogled pruža privid pravilnosti refrakcije u donjim slojevima atmosfere, slika 5 prikazuje stvarne iznose gradijenta modificiranog indeksa loma izračunate iz aerosondažnih podataka, a čiji su iz-



Tablica 1. Karakteristične visine (iznad tla) za pojedine pojave nestandardnih refrakcija radio valova.

Table 1. Characteristic heights above ground for the particular nonstandard refraction phenomena.

	svi podaci (all data)	radio-kanali (radio ducts)	superrefrakcije (superrefractions)	subrefrakcije (subrefractions)
$h_M$ [m]	3094	41	1081	2766
$h_{min}$ [m]	0	0	0	0
$h_{max}$ [m]	34154	5371	6420	8013
$h_{95\%}$ [m]	7781	3279	4248	5842

nosi u troposferi nerijetko izvan područja od 78 do 157 M-jedinica  $\text{km}^{-1}$ , koji nazivamo standardnom refrakcijom. Jaki nestandardni gradijenti izraženi su u donjoj polovici troposfere.

#### Radiokanali

Pojava radiokanala predstavlja ekstremni slučaj nestandardne refrakcije. Na slici 6 prikazan je vremenski niz pojave radiokanala po visini, a na slici 7 prikazana je razdioba čestine radiokanala po visini. Usporedimo li podatke u tablici 1 sa slikama 6 i 7, vidimo da su radiokanali izrazito površinska pojava. U tablici 1  $h_M$  predstavlja medijansku visinu,  $h_{min}$  najmanju visinu, a  $h_{max}$  najveću visinu na kojoj je pojava opažena, dok  $h_{95\%}$  predstavlja graničnu visinu ispod koje je opaženo 95% pojave. Sve visine mjerene su od tla.

U odnosu na ostale nestandardne refrakcijske pojave, radiokanali se javljaju najrjeđe. Pojava pokazuje godišnji hod s najvećim brojem radiokanala, na svim visinama, u ljetnim mjesecima (srpanj) i najmanjom učestalosti u mjesecima veljači i ožujku. Kanali su se javljali većinom na samoj površini ili u prvih 10 m visine, nakon toga je slijedio lokalni minimum, koji se protezao u sloju 200–600 m visine.

#### Superrefrakcije

Superrefrakcije su najčešća nestandardna pojava zabilježena u ovom nizu. Vremenski niz pojava superrefrakcija prikazan je na slici 8, a razdioba čestina pojava po visini prikazana je na slici 9. Superrefrakcije također pokazuju godišnji hod s najvećom učestalosti pojave u ljetnim mjesecima i najmanjom u proljeće. Razdioba čestina pojava superrefrakcija po visini na slici 9 ima sličnosti s razdiobom čestina

pojave kanala po visini na slici 7, s tim da je broj pojava superrefrakcija veći, kako na površini, tako i u visini. Vertikalna razdioba superrefrakcija također pokazuje lokalni minimum učestalosti u sloju 200–600 m visine iznad tla te lokalne maksimume na 600–800 m i u sloju na 1300–1500 m. Ti maksimumi vidljivi su i na slici 7, samo što su manje izraženi. Veća učestalost superrefrakcija na visini vidljiva je i iz podataka u tablici 1 po većoj medijanskoj visini pojave i po većoj graničnoj visini ispod koje je zabilježen 95% slučajeva.

#### Subrefrakcije

Subrefrakcije, čiji je vremenski niz prikazan na slici 10, a razdioba čestina na slici 11, jesu naglašenije visinske pojave. Najveći broj opažanja pojave subrefrakcija zabilježen je također neposredno na površini, ali znatan je i udio visinskih subrefrakcija. U slučaju subrefrakcija zapaža se lokalni minimum u sloju 100–500 m visine iznad tla te lokalni maksimumi u slojevima 1300–1500 m i 2900–3100 m. Lokalni minimumi učestalosti se podudaraju u slučaju sve tri pojave, dok se lokalni maksimumi poklapaju u slučajevima subrefrakcija i superrefrakcija.

## 4. ZAKLJUČAK

Modificirani indeksi loma mogu se sa zadovoljavajućom točnošću modelirati iz temperature, tlaka i vlažnosti izmjerenih redovnim balonskim sondažama. Za neprekinuti niz mjerenja za sedam i pol godina, analizirani su vertikalni profili i vremenski nizovi pojava nestandardne refrakcije iznad aerološke postaje Zagreb-Maksimir. Najčešće pojave nestandardne refrakcije jesu superrefrakcije, slijede subrefrak-

cije i zatim radiokanali. Po vertikalnom profilu radiokanali se najčešće javljaju kao prizemne pojave, superrefrakcije su također dominantno prizemne pojave, ali s većom učestalosti i na visinama, dok su subrefrakcije visinske pojave koje su česte u donjoj polovici troposfere. Sve pojave nestandardne refrakcije pokazuju godišnji hod, s najvećim brojem pojava u ljeto, a najmanjim tijekom zime i u prvoj polovici proljeća.

U budućim istraživanjima naročita pažnja posvetit će se dinamičkim uzrocima promjena vertikalnih profila temperature, vlažnosti i tlaka koji su u tim slojevima doveli do povećane ili smanjene učestalosti nestandardnih pojava.

## LITERATURA

- Battan, L.J., 1973: Radar meteorology. The University of Chicago Press, Chicago, 161 pp.
- Bech, J., B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington, 2002a: Monthly And Daily Variations Of Radar Anomalous Propagation Conditions: How “Normal” Is Normal Propagation? *Proceedings of ERAD*, Copernicus GmbH, 310–314.
- Bech, J., B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington, 2002b: Seasonal Variations of Radar Anomalous Propagation Conditions in a Coastal Area. *URSI Comission-F Open Symposium on Radiowave Propagation and Remote Sensing*, Institut für Hochfrequenztechnik; Deutches Zentrum für Luft und Raumfahrt, 3 pp.
- Bech, J., D. Bebbington, B. Codina, A. Sairouni, J. Lorente, 1998: Evaluation of Atmospheric Anomalous Propagation Conditions: An Application for Weather Radars. *EUROPTO Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, Barcelona, Spain, *SPIE*, **3499**, 5 pp.
- Hitney, H.V., J.H. Richter, R.A. Pappert, K.D. Anderson, G.B. Baumgartner, 1985: Tropospheric Radio Propagation Assessment. *Proceedings of the IEEE*, **73**, No. 2, February 1985, 265–283.
- International Telecommunications Union (ITU), 2003: Recommendation ITU-R P.453-9 The Radio Refractive Index; its formula and refractivity data. ITU, 27 pp.
- Leiterer, U., H. Dier, D. Nagel, T. Naebert, 2002: Method for Correction of RS80 A-Humicap Humidity Profiles. German Weather Service, Meteorological Observatory Lindenberg, Am Observatorium 12, 11 pp. URL: <http://www.metoffice.gov.uk/research/interproj/radiosonde/reports/leiterer.pdf>.
- Patterson, W.L., C.P. Hattan, G.E. Lindem et al., 1994: Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS). Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, San Diego CA, 130 pp.
- Viher, M., 1995: A Practical Method of Modified Refraction Index Computing for the Microwave Radiation Using Atmospheric Probing Measurements. *Croatian Meteorological Journal*, **30**, 63–70.
- Viher, M., 2006: A Study of the Modified Refraction Indices over Alpine and Sub-Alpine Region. *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, No. 6, 625–630.