SADRŽAJ

PREDGOVOR 11
1. OPŠTE O RADARIMA 13
1.1 Definicija radara 13
1.2 Kako radar radi? 14
1.3 Vrste i primena radara 14
1.4 Istorija razvoja radara 17
2. ELEKTROMAGNETNI TALASI 19
2.1 Frekvencije radarskih signala 19
2.2 Indeks refrakcije 22
2.3 Prostiranje radarskih signala u atmosferi 23
2.4 Meteorološki uslovi za pojavu anomalnog prostiranja 29
2.5 Rasipanje elektromagnetnog zračenja na sferi 31
3. KOMPONENTE RADARA 35
3.1 Predajnik 35
3.2 Talasovod i duplekser 38
3.3 Antena 39
3.3.1 Pojačanje antene 43
3.4 Radom 45
3.5 Prijemnik 46
3.6 Radarski produkti i displej 48
4. RADARSKA JEDNAČINA 53
4.1 Radarska jednačina za izolovanu metu 53
4.2 Radarska jednačina za meteorološke mete pri popunjenom snopu 55
4.3 Ekvivalent faktora radarske refleksivnosti za meteorološke mete 59
5. RADARSKI ODRAZI 61
5.1 Vrste meta 61
5.2 Nepadavinske meteorološke mete 62
5.2.1 Oblačni elementi 62
5.2.2 Gradijent indeksa refrakcije 63
5.3 Padavinske meteorološke mete 64
5.3.1 Ukratko o vrstama padavina i mikrofizičkih procesa 64
5.3.2 Kiša i Z–R relacija 65
5.3.3 Vertikalni profili radarskih odraza od padavina 67
5.3.4 Sneg i svetla traka 69
5.3.5 Grad 73

5.4 Nemeteorološke mete 75
5.5 Standardne mete 76
5.6 Karakteristike radarskih odraza koje pomažu njihovoj identifikaciji 78
6. ATENUACIJA RADARSKOG SIGNALA U ATMOSFERI 81
6.1 Atenuacija zbog apsorpcije 81
6.2 Atmosferska atenuacija 82
6.3 Atenuacija od oblačnih elemenata 84
6.4 Atenuacija od kišnih kapi 86
6.5 Atenuacija od snega 89
6.6 Atenuacija od grada 90
6.7 Atenuacija od radoma 91
7. DOPLEROVI RADARI 93
7.1 Pomeraj frekvencije i Doplerova brzina 93
7.2 Doplerova dilema 96
7.3 Preklapanja po daljini i brzini 99
7.4 Mreža Doplerovih radara 105
7.5 Doplerov spektar brzina i turbulencija 108
7.6 Tumačenje polja vetra pomoću Doplerovih brzina 111
8. POLARIZACIONI RADARI 119
8.1 Ukratko o polarizaciji i polarizacionim radarima 119
8.2. Diferencijalna refleksivnost 122
8.3 Depolarizacioni odnos 125
8.4 Diferencijalni fazni pomeraj 126
8.5 Koeficijent korelacije 128
9. PROCENA PADAVINA RADAROM 129
9.1 Merenje padavina: kišomeri protiv radara 129
9.2 Raznovrsnost *Z–R* relacije 132
9.3 Greške u proceni padavina radarom 133
9.4 Kalibracija merenja padavina radarom pomoću kišomera 134
9.5 Procena količine padavina korišćenjem *ATI* metode 136
9.6 Procena padavina iz atenuacije 140
9.7 DVIP nivoi za procenu padavina 141
9.8 Procena padavina iz polarizacionih podataka 142
10. RADARSKO OSMATRANJE VREMENSKIH SISTEMA 145
10.1 Skala razmere vremenskih sistema 145
10.2 Osmatranje kumulonimbusnih oblaka radarima 147
10.2.1 Jednoćelijske oluje 148

10.2.2 Višećelijske oluje 149
10.2.3 Superćelijske oluje 150
10.2.4 Olujni front 152
10.2.5 Slapovi vazduha 154
10.2.6 Eho u obliku luka (bow–echo) 157
10.2.7 Gradonosne oluje 158
10.2.8 Tornado 160
10.3 Osmatranje tropskih ciklona radarima 164
10.3.1 Struktura tropskih ciklona osmotrena radarom 164
11. PREDOČAVANJE RADAROM 169
11.1 Ukratko o predočavanju 169
11.2 Ekstrapolacija kao jednostavan primer predočavanja radarima 170
11.3 Predočavanje padavina 172
11.4 Predočavanje opasnog vremena 173
12. KALIBRACIJA RADARA 175
12.1 Potrebe za kalibracijom i održavanjem 175
12.2 Provera radarskih parametara 176
12.2.1 Emitovana snaga 176
12.2.2 Merenje frekvencije radarskih impulsa 178
12.2.3 Merenje vremena trajanja impulsa 179
12.2.4 Podešavanje antene i merenje pojačanja antene 179
12.2.5 Kalibracija pomoću Sunca 181
12.2.6 Merenje rastojanja i Doplerove brzine 184
12.2.7 Oblik i širina radarskog snopa 185
12.2.8 Kalibracija prijemnika 185
12.3 Tipične greške pri radarskim osmatranjima 188
12.4 Mreže operativnih meteoroloških radara u svetu 189
13. OSTALI AKTIVNI SENZORI ZA DALJINSKA MERENJA 193
13.1 Profajleri vetra 193
13.2 Sodari 197
13.3 Lidari 198
13.3.1 Lidarska jednačina 199
14. OPŠTE O SATELITIMA 203
14.1 Princip rada satelita i primena u meteorologiji 203
14.2 Istorijat razvoja satelitske meteorologije 204
14.3 Uticaj satelitskih podataka na prognozu vremena 207
15. ORBITE SATELITA 209
15.1 Kružne orbite satelita 209
15.2 Eliptične orbite satelita 212

15.2.1 Elementi orbite 213
15.2.2 Poremećenja orbite 216
15.3 Vrste orbita meteoroloških satelita 217
15.3.1 Geostacionarne orbite 217
15.3.2 Orbite sinhronizovane sa Suncem 218
16. PRENOS ZRAČENJA 221
16.1 Zakoni zračenja crnog tela 221
16.2 Jednačina radijacionog transfera 223
16.2.1 Jednačina radijacionog transfera pri odsustvu rasipanja 226
16.3 Atmosferska apsorpcija zračenja 227
16.3.1 Spektar dugotalasnog zračenja 230
17. SATELITSKI INSTRUMENTI 233
17.1 Instrumenti na polarno-orbitalnim satelitima 233
17.1.1 Napredni radiometar veoma visoke rezolucije–AVHRR 233
17.1.2 Infracrveni sondažer visoke rezolucije–HIRS 235
17.1.3 Napredni mikrotalasni sondažer–AMSU 237
17.1.4 Ostali instrumenti na polarno-orbitalnim NOAA satelitima 238
17.2 Instrumenti na geostacionarnim satelitima 238
17.2.1 GOES napredni snimač–ABI 238
17.2.2 GOES geostacionarni maper munja–GLM 241
17.2.3 Ostali GOES instrumenti 241
17.2.4 Meteosat-ov poboljšani rotirajući snimač – SEVIRI 242
18. TUMAČENJE SATELITSKIH SLIKA 245
18.1 Satelitske slike u raznim spektralnim kanalima 245
18.1.1 Vizuelne slike 245
18.1.2 Infracrvene slike 246
18.1.3 Satelitske slike u kanalu vodene pare 247
18.1.4 Mikrotalasne slike 248
18.2 Greške pri analizama satelitskih slika 249
18.2 Tumačenje nekih atmosferskih fenomena 250
18.2.1 Oblaci 250
18.2.2 Tropski cikloni 251
18.2.3 Intertropska zona konvergencije 251
18.2.4 Grmljavinske oluje 252
18.2.5 Turbulencija 252
18.2.6 Snežni i ledeni pokrivač 252
19. SATELITSKO MERENJE METEOROLOŠKIH VELIČINA 253
19.1 Vertikalna sondaža atmosfere 253
19.2 Tehnika rascepljenog prozora 256
19.3 Određivanje padavinske vode 259

19.4 Određivanje temperature površine mora i kopna 260
19.4.1 Određivanje temperature površine pomoću histograma 261
19.4.2 Određivanje temperature površine regresijom 263
19.5 Određivanje vertikalnih profila temperature i vlage 266
19.6 Testovi detekcije oblaka 269
19.7 Tehnike detekcije padavina 270
19.7.1 Padavinski indeks 270
19.7.2 Mikrotalasne tehnike 272
19.8 Određivanje vektora vetra 273
19.9 Satelitsko merenje intenziteta tropskih ciklona 274
Dodatak A Specifikacija nekih savremenih radara 279
Dodatak B Specifikacija meteoroloških radara u Srbiji 281
Dodatak C Neki operativni meteorološki sateliti 283
Dodatak D Skraćenice 285
Dodatak E Sistem jedinica 287
Dodatak F Simboli 289
Dodatak G Fizičke konstante 297
Literatura 299
Indeks 309

PREDGOVOR

Daljinska merenja predstavljaju indirektan način merenja stanja atmosfere putem instrumenata koji nisu u direktnom kontaktu sa sredinom koju mere. Uređaji koji koriste tehniku daljinskih merenja rade na principu merenja zračenja i mogu se klasifikovati na aktivne i pasivne senzore. Aktivni senzori emituju i potom primaju povratno rasuto zračenje od objekata koji su od interesa. U tu grupu spadaju, pre svega, radari, ali i lidari, profajleri vetra i sodari. Nasuprot njima, pasivni senzori samo primaju zračenje od objekata koje mere i u tu grupu spadaju sateliti. Daljinska merenja su, u stvari, skup više poddisciplina od kojih su najvažnije radarska i satelitska meteorologija. Ove dve discipline su deo fizičke meteorologije i u tesnoj su vezi sa fizikom oblaka, pošto su oblaci najvažniji objekti koji se mere ovim senzorima. Daljinska merenja u meteorologiji se primenjuju i razvijaju od konstrukcije prvog meteorološkog radara, od polovine prošlog veka, da bi potom, deceniju kasnije, počeli da se koriste sateliti, kao i lidari, otkrićem lasera.

Cilj merenja pomoću radara i satelita je bolji uvid u vremenske uslove iznad neke oblasti i korišćenje radarskih i satelitskih podataka kao početnih uslova za start numeričkih modela prognoze vremena, što vodi uspešnijoj prognozi u kratkom prognostičkom roku. Podaci dobijeni pomoću radara i satelita obezbeđuju dodatne informacije u oblastima koje su pokrivene mrežom meteoroloških stanica. Meteorološki radari i sateliti su veoma korisni u predviđanju količine padavina koja će se izlučiti iznad nekog mesta, kao i za najavu opasnog vremena u narednom periodu. Sateliti su posebno značajni jer za kratko vreme mogu da skeniraju velike delove planete Zemlje, da prepoznaju tropske ciklone kada su još daleko od kopna; pogotovo su značajni na onim mestima koja su siromašna meteorološkim podacima.

Ova knjiga je osmišljena u nameri da sveobuhvatno prikaže problematiku daljinskih merenja u meteorologiji, pre svega, korišćenje radara i satelita u meteorologiji. U prvom delu knjige su date teorijske i praktične metode upotrebe radara, kao i drugih sistema koji rade na principu sličnom radarima – lidarima, profajlerima vetra i sodarima, dok je drugi deo knjige posvećen satelitskoj meteorologiji. Njena osnovna namena je da posluži kao udžbenik za predmet Daljinska merenja za studente treće godine smera meteorologija na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Pored svoje osnovne namene, može biti od interesa i drugim korisnicima koji žele da se upoznaju ili produbе znanja o metodama istraživanja atmosfere, koristeći daljinska merenja.

U Beogradu, septembra 2019. god. *Nemanja Kovačević*

1

OPŠTE O RADARIMA

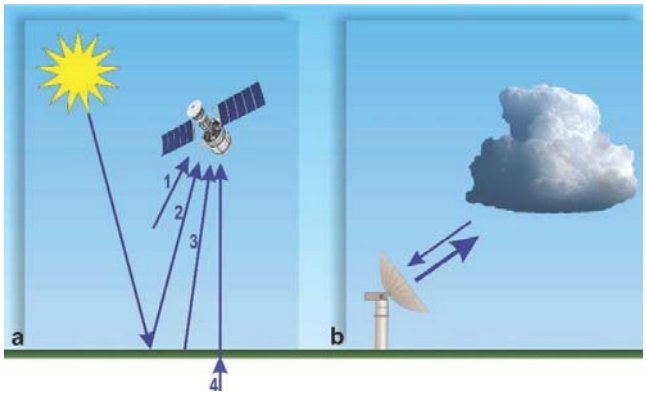
U ovom poglavlju ćemo se upoznati sa pojmom radara, vrstama i primenom radara u raznim oblastima, kao i kratkim istorijatom razvoja radarske tehnike.

1.1 Definicija radara

RADAR je uređaj koji ima mogućnost da stvara i šalje u prostor snažne signale iz opsega radio i mikrotalasnih frekvencija i da prima povratne ehoe od udaljenih objekata koji su od interesa. Ti objekti se često nazivaju i mete, pošto je prva primena radara bila za vojne potrebe. Pored toga, radar mora biti sposoban da primljene signale od udaljenog objekta dalje obrađuje da bi odredio njegove karakteristike. Radar je prvi uređaj koji je počeo da se koristi u meteorologiji od uređaja koji koriste tehniku udaljenih merenja. Dakle, radar je indirektan senzor pri merenju pošto nije u neposrednom kontaktu sa objektom koji meri.

RADAR je skraćenica engleske sintagme – Radio Detection And Ranging, u kojoj se ogleda ukratko svrha njegovog rada – radio otkrivanje i merenje rastojanja. On pripada grupi aktivnih senzora za daljinska merenja, u koje još spadaju lidari, sodari i profajleri vetra, pošto ima sposobnost da stvara energiju koja će se dalje koristiti, za razliku od pasivnih senzora kao što su sateliti, koji mere zračenje drugih tela (*Slika* 1.1). To donosi neke dodatne informacije u odnosu na pasivne senzore, kao što su: vreme proteklo od slanja do primanja signala, jačina povratnog signala, promena frekvencije i/ili polarizacije primljenog signala u odnosu na

emitovani signal. Ove dodatne informacije mogu pomoći u određivanju karakteristika objekta koji se izučava i sredine između radara i datog objekta.



Slika 1.1: Pasivni (*a*) i aktivni senzori (*b*) kod daljinskih merenja.

1.2 Kako radar radi?

Prvo je potrebno da radar stvori elektromagnetni signal. Komponenta radara koja generiše elektromagnetne talase se naziva predajnik. Dati signal je potrebno poslati u nekom pravcu, u pravcu objekta koji se želi meriti. Slanje signala u nekom pravcu omogućava antena radara. Energija elektromagnetnih talasa koja je poslata delom se reflektuje od površine objekta u svim pravcima, delom propusti kroz objekat, dok se deo apsorbuje od njega. Samo mali deo energije se vrati nazad ka anteni radara i registruje pomoću prijemnika. Ako je emitovano elektromagnetno zračenje snage od npr. 10^6 W, tipično se vrati oko 10^{-13} W snage, što daje da je odnos ehoa primljenog signala od mete u odnosu na emitovani signal – 10^{-19}, drugim rečima primljeni signal je tipično 190 dB (decibela) slabiji od poslatog signala (Skolnik, 2008). Po primanju signala, signal procesor omogućava njegovu obradu i dobijanje raznih informacija: rastojanje od mete, jačinu ehoa, brzinu mete. Konačno, putem displeja radara je moguće vizuelno prikazati date veličine.

1.3 Vrste i primena radara

Klasifikaciju tipova radara možemo dobiti na osnovu raznih kriterijuma. Možemo klasifikaciju izvršiti na osnovu toga da li predajna antena koja šalje signal služi i kao prijemna antena koja prima signal. Tako se može govoriti o monostatičkim i bistatičkim radarima. Monostatički radar je radar kod koga antena služi