

Dr Nemanja Kovačević
DALJINSKA MERENJA U METEOROLOGIJI

Recenzenti:
Dr Dejan Janc,
Dr Vladan Vučković

Ovaj udžbenik odobrilo je Nastavno-naučno veće Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu, odlukom od 11. septembra 2019. godine

Izdavač:
AGM knjiga d.o.o
Beograd – Zemun
<http://www.agmknjiga.co.rs>
e-mail: agmknjiga@gmail.com

Glavni i odgovorni urednik:
Slavica Sarić – Ahmić

Tehnički urednik:
Dragomir Bulatović

Štampa:
Donat graf, Beograd

Tiraž:
100 primeraka

Korica:
Superćelijska oluja sa tornadom
RC Valjevo; Polarno-orbitalni satelit;
Kompozitna radarska slika; Satelitska slika sa GOES-13

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

551.508(075.8)

КОВАЧЕВИЋ, Немања, 1981-

Daljinska merenja u meteorologiji / Nemanja Kovačević.
- Beograd : AGM knjiga, 2019 (Beograd : Donat graf).
- 315 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 100. - Bibliografija: str. 299-307. - Registar.

ISBN 978-86-6048-012-7

a) Метеоролошки инструменти
COBISS.SR-ID 279600140

** Ovu knjigu, u delovima ili u celini, moguće je štampati, fotokopirati i prenositi u elektronskom obliku samo uz dozvolu Izdavača i autora. Sva prava za njeno objavljivanje zadržavaju Izdavač i autor, u skladu sa Zakonom o autorskim pravima.*

Dr Nemanja Kovačević

**DALJINSKA MERENJA U
METEOROLOGIJI**

Beograd,
2019.

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 reflektivnost	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	Višćelijske 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.	PREDOĆAVANJE RADAROM	169
11.1	Ukratko o predoćavanju.....	169
11.2	Ekstrapolacija kao jednostavan primer predoćavanja radarima	170
11.3	Predoćavanje padavina	172
11.4	Predoćavanje opasnog vremena	173
12.	KALIBRACIJA RADARA	175
12.1	Potrebe za kalibracijom i odrćavanjem.....	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	Podećavanje antene i merenje pojaćanja 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	Tipiće greške pri radarskim osmatranjima.....	188
12.4	Mreće 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 jednaćina.....	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	Uticao satelitskih podataka na prognozu vremena.....	207
15.	ORBITE SATELITA	209
15.1	Krućne orbite satelita	209
15.2	Eliptiće 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 mape 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 sensorima. 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 pokrivena 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 prodube znanja o metodama istraživanja atmosfere, koristeći daljinska merenja.

U Beogradu, septembra 2019. god.

Nemanja Kovačević

OPŠTE O RADARIMA

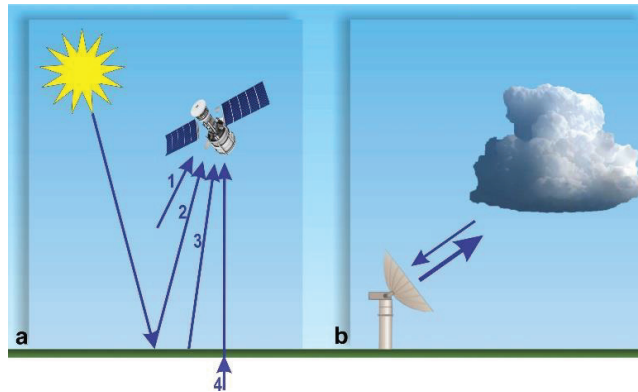
U ovom poglavlju ćemo se upoznati sa pojmom radara, vrstama i primenom radara u raznim oblastima, kao i kratkim istorijatom razvoja radarske tehnike.

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 karaktera 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