

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Goran Marković, Marija Malnar

OSNOVI RADIO KOMUNIKACIJA

BEOGRAD
2024.

Goran Marković, Marija Malnar
OSNOVI RADIO KOMUNIKACIJA
I izdanje

Recenzenti: dr Valentina Radojičić
dr Mirjana Stojanović
Za izdavača: dr Nebojša Bojović, dekan
Glavni i odgovorni urednik: dr Mirjana Bugarinović
Tehnički urednik: Predrag Knežević
Korice: Predrag S. Zdravković
Izdavač: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet,
Vojvode Stepe 305; telefon: 011 3976 017;
faks: 011 3096 704; www.sf.bg.ac.rs
Priprema: Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta;
telefon: 011 3091 344; idsf@sf.bg.ac.rs;
(skriptarnica) sfknjige@sf.bg.ac.rs
Štampa: DONAT GRAF DOO BEOGRAD,
Vučka Milićevića, 29, 11306 Grocka;
telefon: 011 29 28 265; www.donatgraf.com
Tiraž: 125 primeraka
ISBN 978-86-7395-485-1

Na osnovu odluke Uređivačkog odbora Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, broj 445/2 od 29. marta 2024. godine, odobrava se za upotrebu u nastavi kao osnovni udžbenik na osnovnim studijama za predmet „Osnovi radio komunikacija”.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.396(075.8)

МАРКОВИЋ, Горан 3., 1971-

Osnovi radio komunikacija / Goran Marković, Marija Malnar. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Saobraćajni fakultet, 2024 (Beograd : Donat graf). - 424 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 125. - Spisak pojmova: str. 405-414. - Beleška o autorima: str. 423-424. -

Bibliografija: str. 381-384. - Registar.

ISBN 978-86-7395-485-1

1. Малнар, Марија 3., 1983- [аутор]

а) Радиовезе б) Радиотехника

COBISS.SR-ID 150856457

Izdavač zadržava sva prava. Reprodukција pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

Sadržaj

Predgovor	11
1 UVOD	15
1.1 Radio-frekvencijski spektar	16
1.2 Model radio-komunikacionog sistema	19
1.3 Karakteristike radio kanala	20
1.4 Osnovni parametri radio-komunikacionih sistema	21
1.5 Tipovi radio-komunikacionih sistema.....	23
1.6 Istorijat radio-komunikacija	24
2 REGULATIVA U OBLASTI RADIO KOMUNIKACIJA	27
2.1 Regulatorna tela i organizacije u radio komunikacijama	27
2.2 Dokumenta međunarodne regulative	29
2.3 Označavanje radio emisija	30
2.4 Upravljanje RF spektrom	31
2.4.1 Planiranje RF spektra.....	32
2.4.2 Nadzor RF spektra	35
2.4.3 Kontrolno-merni centri	37
2.5 Dozvola za rad radio stanice	42
2.6 Kategorije radio službi	43
2.7 Ocena kvaliteta radio emisija	43

3 OSNOVNE KARAKTERISTIKE I PROPAGACIONI	
PARAMETRI EM TALASA.....	45
3.1 Pojam EM talasa	46
3.2 Komponente EM polja	47
3.3 EM parametri i tipovi sredina.....	48
3.3.1 Klasifikacija sredina prema provodnim svojstvima.....	50
3.4 Tipovi EM talasa u različitim sredinama	54
3.5 Maksvelov sistem jednačina.....	55
3.6 Pointingova teorema.....	56
3.7 Ravanski talasi	57
3.8 Propagacioni parametri EM talasa	59
3.8.1 Brzina prostiranja.....	59
3.8.2 Indeks refraktivnosti	60
3.8.3 Talasna dužina	61
3.8.4 Karakteristična (talasna) impedansa	62
3.8.5 Intenzitet Pointingovog vektora.....	62
3.8.6 Slabljenje i dubina prodiranja	62
3.9 Polarizacija EM talasa.....	64
4 GENERISANJE I PRIJEM RADIO TALASA – ANTENE.....	69
4.1 Model elementarne antene	70
4.2 Osnovni princip rada antena.....	71
4.3 Regioni bliskog i dalekog polja antene	73
4.4 Zračenje antene u dalekom polju	74
4.5 Idealizovane antene.....	77
4.5.1 Izotropni radijator	77
4.5.2 Inkrementalni linearni radijator	78
4.6 Osnovni parametri antena.....	80
4.6.1 Dijagram zračenja antene.....	80
4.6.2 Direktivnost antene	83
4.6.3 Dobitak antene	84
4.6.4 Impedansa antene, otpornost i efikasnost zračenja	86
4.6.5 Širina snopa zračenja	88
4.6.6 Propusni opseg antene	89
4.6.7 Princip reciprociteta.....	89
4.6.8 Otvor (apertura) prijemne antene.....	90

4.7	Antene u slobodnom prostoru	92
4.8	Uticaj Zemlje na zračenje antene	94
4.9	Primeri i karakteristike nekih realnih antena.....	95
4.9.1	Dipol antene.....	96
4.9.2	Monopoli	99
4.9.3	Antene sa malom petljom	100
4.9.4	Sistem lineičnih antena (antenski niz)	101
4.9.5	Antene sa zračćim otvorom.....	105
4.9.6	Patch antene.....	108
5	OSNOVNI PRINCIPI PROSTIRANJA RADIO TALASA	111
5.1	Naćini prostiranja radio talasa.....	113
5.2	Prostiranje talasa u pojedinim RF opsezima	117
5.3	Osnovni propagacioni mehanizmi.....	119
5.3.1	Refleksija i refrakcija.....	119
5.3.2	Rasejanje.....	122
5.3.3	Difrakcija	124
5.3.4	Talasovodna propagacija	125
5.3.5	Prostiranje po višestrukim putanjama.....	127
5.4	Uticaji Zemlje i atmosfere na prostiranje radio talasa.....	129
5.4.1	Uticaj Zemlje na prostiranje radio talasa	131
5.4.2	Uticaj troposfere na prostiranje radio talasa	132
5.4.3	Uticaj jonosfere na prostiranje radio talasa.....	134
5.5	Jednaćine prostiranja i modeli propagacije	136
5.5.1	Model prostiranja u slobodnom prostoru.....	136
5.5.2	Model prostiranja iznad ravne provodne Zemlje	139
5.5.3	Modeli propagacije u realnim okruženjima	140
5.6	Varijacije nivoa signala (feding).....	141
5.7	Primene i karakteristike pojedinih RF opsega.....	142
6	PROSTIRANJE POVRŠINSKIH TALASA.....	147
6.1	Prostiranje iznad homogene trase.....	149
6.1.1	Procena jaćine elektrićnog polja	152
6.1.2	Faktor slabljenja površinskog talasa	153
6.1.3	Grafićka metoda za procenu jaćine elektrićnog polja.....	155
6.2	Prostiranje iznad nehomogene trase.....	157
6.2.1	ITU-R metod.....	157

6.2.2	Milingtonov metod	158
6.3	Uticaj šuma na prijemu	159
6.3.1	Osnovne karakteristike atmosferskog šuma.....	160
6.3.2	Minimalno potrebno polje na prijemu	161
6.4	Procena zone servisa LF/MF radio-difuznog predajnika	163
6.5	Interferencija površinskog i jonosferskog talasa	164
6.6	Prostiranje VLF talasa	166
6.6.1	Faktor slabljenja.....	169
6.6.2	Jačina električnog polja.....	169
6.6.3	Pojava fedinga.....	170
6.7	Antene za niske učestanosti.....	170
7	PROSTIRANJE JONOSFERSKIH TALASA	173
7.1	Struktura i parametri jonosfere.....	175
7.1.1	Proces jonizacije i slojevi jonosfere.....	175
7.1.2	Uticaj jonosfere na talase različitih učestanosti	179
7.1.3	Parametri jonosfere	181
7.2	Mehanizam jonosferske refleksije.....	185
7.2.1	Kritična frekvencija – vertikalno upadanje talasa.....	188
7.2.2	Koso upadanje, ugao elevacije i prividna visina.....	190
7.2.3	Veličina skoka i „mrtva zona”	191
7.2.4	Uticaj visine reflektujućeg sloja, ugla elevacije i učestanosti talasa na veličinu skoka.....	192
7.2.5	Propagacione trajektorije jonosferskih talasa	193
7.2.6	Uticaj zakrivljenosti Zemlje i jonosfere.....	195
7.2.7	Maksimalna, optimalna i minimalna upotrebljiva frekvencija..	196
7.2.8	Jednačine prostiranja jonosferskog talasa	198
7.3	Promene karakteristika jonosfere	201
7.3.1	Pravilne promene jonosfere	201
7.3.2	Nepravilne promene jonosfere	205
7.3.3	Feding u jonosferskim vezama	206
7.4	Jonosferske prognoze	207
7.5	Raspored radnih frekvencija jonosferske veze	209
7.6	Faktor pouzdanosti jonosferske veze	212
7.7	Antene za HF opseg	214

8	PROSTIRANJE PROSTORNIH TALASA.....	215
8.1	LoS prostiranje – domet veze.....	218
8.2	Refleksija talasa od površine Zemlje	219
8.2.1	Refleksija od ravne Zemlje	220
8.2.2	Refleksija od zakrivljene Zemlje	224
8.2.3	Divergencija prostornih talasa	225
8.2.4	Zavisnost nivoa prijemnog signala od učestanosti.....	226
8.3	Difrakcija talasa na preprekama.....	227
8.3.1	Difrakcija na oštrici noža.....	229
8.3.2	Difrakcija na sfernoj površini	231
8.3.3	Frenelova zona.....	232
8.4	Refrakcija talasa u troposferi	234
8.4.1	Parametri troposfere.....	235
8.4.2	Modeli troposfere.....	238
8.4.3	Mehanizam troposferske refrakcije	239
8.4.4	Vođena (tunelska) propagacija talasa	244
8.4.5	Prostiranje po višestrukim putanjama.....	246
8.5	Feding u radio vezama sa prostornim talasom	250
8.5.1	Feding usled promenljivih uslova refraktivnosti troposfere	251
8.5.2	Feding usled efekta <i>multipath</i> propagacije	252
8.5.3	Feding pri tunelskoj propagaciji	253
8.6	Antene za prostorne radio talase	253
9	PROSTIRANJE RASEJANJEM U ATMOSFERI.....	255
9.1	Troposfersko rasejanje	256
9.1.1	Modelovanje veze sa troposferskim rasejanjem	257
9.1.2	Spore (dugotrajne) varijacije	260
9.1.3	Brze (kratkotrajne) varijacije	260
9.1.4	Kombinovane (brze i spore) varijacije.....	261
9.1.5	Efektivni poprečni presek volumena rasejanja	261
9.2	Jonosfersko rasejanje	262
9.2.1	Jednačine prostiranja	263
9.2.2	Automatsko ponavljanje zahteva	264
9.3	Meteorsko rasejanje	265
9.4	Rasejanje prouzrokovano hidrometeorima.....	266

10 FIKSNE USMERENE RADIO VEZE OD TAČKE DO TAČKE 271

10.1	Propagacioni efekti u R-R vezama.....	272
10.1.1	Slabljenje propagacione trase	273
10.1.2	Pojava fedinga u R-R vezama.....	280
10.1.3	Distorzija signala usled <i>multipath</i> propagacije	281
10.2	Planiranje i projektovanje digitalnih R-R veza	282
10.3	Tehničko rešenje R-R veze	284
10.4	Proračun kvaliteta digitalne R-R veze.....	286
10.5	Proračun raspoloživosti R-R veze	294
10.5.1	Neraspoloživost veze zbog kvara na uređajima.....	295
10.5.2	Neraspoloživost veze zbog uslova prostiranja	295
10.6	Poređenje kvaliteta sa ITU-R normama	296

11 RADIO VEZE ZA POKRIVANJE OBLASTI 297

11.1	Karakteristike mobilnih radio kanala	298
11.1.1	Slabljenje trase	299
11.1.2	Osnovni propagacioni mehanizmi	302
11.1.3	Feding u mobilnim radio kanalima	303
11.1.4	Feding u fiksnim radio kanalima	314
11.2	Modelovanje karakteristika radio kanala	315
11.2.1	Klasifikacija propagacionih modela	315
11.2.2	Propagacioni modeli za spoljašnja okruženja	318
11.2.3	Modeli jednostrukog i dvostrukog nagiba	318
11.2.4	Okumura-Hata model	319
11.2.5	COST-231 model.....	320
11.2.6	ITU-R modeli.....	321
11.2.7	ECC-33 model	325
11.2.8	Model Li-a	326
11.2.9	Ibrahim-Parsonov model.....	328
11.2.10	SUI model	329
11.2.11	Vinerov model	331
11.2.12	Propagacioni modeli za fiksni širokopojasni pristup	333
11.2.13	5GCM modeli	334
11.2.14	Propagacioni modeli unutar objekata.....	335
11.2.15	Kombinovani propagacioni modeli.....	342

12 SATELITSKE RADIO VEZE	345
12.1 Model satelitskog sistema	345
12.1.1 Vrste satelitskih orbita	346
12.1.2 Kretanje satelita po kružnoj orbiti	348
12.1.3 Parametri satelita u kružnoj orbiti	349
12.2 Frekvencije za satelitske veze	350
12.3 Propagacioni efekti u satelitskim vezama	352
12.3.1 Slabljenje slobodnog prostora	352
12.3.2 Atmosferski uticaji	353
12.3.3 Uticaji jonosfere	354
12.3.4 Uticaji troposfere	357
12.3.5 Feding u satelitskim vezama	359
12.4 Projektovanje satelitskih radio veza	361
12.4.1 Proračun budžeta snage	361
12.4.2 Procena kvaliteta veze	364
12.5 Antene za satelitske komunikacije	366
13 DIVERSITI SISTEMI	367
13.1 Osnovni koncept diversitija	368
13.2 Načini realizacije diversiti sistema	369
13.2.1 Vremenski diversiti	369
13.2.2 Frekvencijski diversiti	370
13.2.3 Prostorni diversiti	370
13.2.4 Polarizacioni diversiti	373
13.3 Tehnike diversiti kombinovanja	373
13.3.1 Selekcioni diversiti	374
13.3.2 Skenirajući diversiti	374
13.3.3 Diversiti sa maksimizacijom odnosa signal/šum	375
13.3.4 Diversiti sa istim doprinosima pojedinačnih grana	375
13.4 Poređenje tehnika diversiti kombinovanja	376
13.5 Višekanalni RAKE prijemnik	379
Literatura	381
PRILOZI	385
Prilog I	387

Prilog II.....	392
Prilog III	396
Spisak skraćenica.....	401
Spisak pojmova	405
Spisak slika.....	415
Spisak tabela	421
Beleška o autorima	423

Predgovor

Udžbenik „Osnovi radio komunikacija” razmatra osnovne aspekte koji se odnose na principe prostiranja elektromagnetnih (EM) radio talasa u sistemima bežičnih komunikacija, a namenjen je prvenstveno studentima Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu koji prate nastavu iz istoimenog predmeta na osnovnim akademskim studijama na modulu Telekomunikacioni saobraćaj i mreže. Pored toga, ovaj udžbenik može poslužiti i studentima srodnih profila za sticanje potrebnih znanja iz oblasti radio komunikacija, a s obzirom na sadržinu materije može biti od praktične koristi i širem krugu drugih stručnjaka, inženjera i projekatanta radio-komunikacionih sistema.

Materija koju pokriva udžbenik organizovana je u trinaest poglavlja.

Prvo poglavlje je uvodno i namenjeno je upoznavanju čitalaca sa osnovnim pojmovima koji se koriste u oblasti radio komunikacija, podelom radio-frekvencijskog (RF) spektra na podopsege, opštim modelom, parametrima, karakteristikama i tipovima radio-komunikacionih sistema, uz kraći osvrt na istorijat radio komunikacija.

Drugo poglavlje posvećeno je aspektima regulative u oblasti radio komunikacija, kao najvažnijem i izuzetno složenom problemu, čije sveobuhvatno rešavanje ima za cilj efikasno, racionalno, ravnopravno i ekonomično korišćenje ograničenog dostupnog RF spektra, od nacionalnog do globalnog nivoa.

Treće poglavlje razmatra osnovne karakteristike EM talasa, njihove propagacione parametre i tipove različitih sredina kroz koje se talasi prostiru, u cilju sagledavanja osnovnih teorijskih aspekata i razumevanja neophodnih pojmova koji će biti od značaja za dalja izlaganja materije u ovom udžbeniku.

U četvrtom poglavlju razmatraju se uređaji kojima se ostvaruje generisanje i prijem radio talasa – antene. Polazeći od modela elementarne antene i apstraktnog

objašnjenja principa rada antena, opisan je model idealizovane izotropne tačkaste i inkrementalne linearne antene, objašnjeni su osnovni parametri antena i detaljnije opisani neki primeri realnih antena koje se sreću u praktičnim primenama.

Peto poglavlje ima za cilj da čitaoca plenarno upozna sa osnovnim principima i mogućim načinima prostiranja radio talasa, kao i sa različitim efektima koji mogu nastati pri njihovom prostiranju. Opisani su osnovni propagacioni mehanizmi radio talasa, objašnjeni dominantni uticaji Zemlje i atmosfere na njihovo prostiranje, predstavljeni osnovni oblici jednačina prostiranja i opisani idealizovan model prostiranja talasa u slobodnom prostoru i model prostiranja iznad idealno ravne provodne Zemlje. Osim toga, sistematizovano su predstavljene opšte karakteristike prostiranja radio talasa u pojedinim RF opsezima učestanosti i opisane njihove osnovne primene.

Šesto poglavlje posvećeno je prostiranju površinskih radio talasa, što predstavlja dominantan način prostiranja za talase iz nižeg dela RF spektra. Najpre je razmatran scenario prostiranja talasa iznad homogene trase, opisana je primena računске i grafičke metode za procenu jačine električnog polja, a zatim su objašnjenje i metode koje se uobičajeno primenjuju u praksi za slučaj nehomogenih propagacionih trasa. Razmatran je uticaj šuma (posebno atmosferskog) i minimalnog potrebnog polja za postizanje zahtevanog kvaliteta prijema za pojedine vrste službi, a zatim je analiziran i uticaj interferencije površinske i jonosferske komponente talasa na zonu servisa radio predajnika. Posebno je analiziran efekat talasovodne propagacije koji se javlja pri najnižim RF učestanostima.

U sedmom poglavlju analizirana je propagacija jonosferskih talasa, kao specifičnog načina prostiranja zasnovanog na refleksiji radio talasa od jonosfere, što je dominantan način prostiranja za talase visokih učestanosti (iz HF opsega). Najpre je objašnjen efekat jonizacije atmosfere i struktura jonosfere, opisane su karakteristike pojedinih jonosferskih slojeva i njihov uticaj na talase različitih učestanosti. Nakon toga, objašnjen je mehanizam jonosferske refleksije talasa, detaljno su analizirani najvažniji propagacioni parametri jonosfere i opisan model za projektovanje budžeta snage jonosferske radio veze. Na kraju su opisane karakteristične promene propagacionih uslova jonosfere i načini procene (prognoze) njenih parametara. Takođe, prikazan je metod za procenu faktora pouzdanosti veze i analizirana pojava fedinga u jonosferskim vezama.

Osmo poglavlje se odnosi na propagaciju prostornih radio talasa u nižoj troposferi, što je dominantan način prostiranja za radio talase iz viših RF opsega učestanosti (iznad 30 MHz). Objasnjen je idealizovan scenario propagacije talasa po liniji optičke vidljivosti, predstavljeni su osnovni parametri i propagacione karakteristike troposfere i analizirani tipični efekti pri propagaciji prostornih radio talasa, uključujući mehanizme refleksije, refrakcije, difrakcije, prostiranja po višestrukim putanjama, tunelske troposferske propagacije talasa. Osim toga, analizirana je i pojava fedinga u vezama koje se ostvaruju prostornim radio talasima.

U devetom poglavlju opisano je prostiranje prostornih radio talasa zasnovano na mehanizmu rasejanja u atmosferi, uključujući troposfersko, jonosfersko, meteorsko, kao i rasejanje usled kiše.

Deseto poglavlje razmatra specifičnosti propagacije prostornih radio talasa u usmerenim zemaljskim radio-relejnim (R-R) vezama. Detaljno su analizirani uticaji atmosfere na prostiranje talasa iz mikrotalasnih opsega učestanosti, uključujući posebno efekte atmosferskog slabljenja prouzrokovanog molekulima gasova i hidrometeorima. Na kraju poglavlja opisan je postupak projektovanja digitalnih R-R veza, uključujući proračun kvaliteta i raspoloživosti veze.

U jedanaestom poglavlju analizirane su specifičnosti propagacije radio talasa u sistemima za pokrivanje oblasti, sa posebnom akcentom na fenomene propagacije i karakterizaciju mobilnih radio kanala. Takođe, prikazan je sistematizovan pregled velikog broja u literaturi predloženih modela za procenu slabljenja signala u različitim tipovima propagacionih okruženja. Posebno su analizirane propagacione karakteristike i uticaji radio kanala na prenošeni signal, kao i tipovi fadinga koji se mogu javiti u ovim radio kanalima.

Dvanaesto poglavlje posvećeno je satelitskim radio vezama. Nakon prikaza uopštenog modela satelitske veze, razmatran je izbor pogodnih radnih frekvencija i najvažniji efekti pri propagaciji radio talasa u satelitskim vezama, a poseban akcenat stavljen je na projektovanje satelitskih radio linkova.

U fokusu poslednjeg, trinaestog poglavlja nalaze se diversiti tehnike, koje se mogu primenjivati kao jedan od veoma efikasnih pristupa za ublažavanje uticaja fadinga u radio kanalima. Opisane su različite tehnike koje se koriste u realizaciji diversiti sistema, kao i metode diversiti kombinovanja signala na prijemu, a zatim su upoređene različite metode sa aspekta diversiti dobitka.

Na kraju knjige dati su spisak literature, prilozi, spisak skraćica, kao i rečnik najvažnijih pojmova koji se koriste u tekstu. Materija izložena u ovoj knjizi usaglašena je i čini neodvojivu celinu sa postojećim pomoćnim udžbenicima: „Osnovi radio komunikacija – zbirka zadataka” i „Praktikum iz Osnova radio komunikacija”.

Pisanje ovog udžbenika posebno je inspirisano u znak izražavanja izuzetnog poštovanja i ogromne zahvalnosti autora pok. prof. dr Vladanki Aćimović-Raspopović, idejnom začetniku, kreatoru programa i dugogodišnjem nastavniku na ovom predmetu. Materijali koje je profesorka brižno pripremala za časove predavanja, zasnovani na dve veoma korisne knjige: Griffiths, J., „Radio Wave Propagation and Antennas – An Introduction”, Prentice-Hall, Int., 1987. i Saunders, S., Aragon-Zavala, A. „Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, Wiley, 2007, korišćeni su kao okosnica za izradu ovog udžbenika.

Ovim putem, autori izražavaju ogromnu zahvalnost recenzentima knjige prof. dr Mirjani Stojanović i prof. dr Valentini Radojičić, koje su svojim veoma

korisnim savetima i sugestijama doprinele značajnom unapređenju kvaliteta udžbenika.

I pored toga, sve eventualne nesavršenosti u pisanju, kao i greške koje se svakako mogu uvek pronaći, zajedno sa sugestijama čitalaca koje bi doprinele daljem poboljšanju kvaliteta, autori će sa zadovoljstvom prihvatiti i ispraviti u narednim izdanjima ovog udžbenika.

U Beogradu, marta 2024. godine

Autori