

Robert Nađ

OSNOVE BEŽIČNIH KOMUNIKACIJA



ELEMENT

FER

1. OSNOVNI POJMOVI KOMUNIKACIJSKIH RESURSA	1
1.1. Općenite značajke radiokomunikacijskih sustava	1
1.2. Pojmovi vezani uz prijenos poruke	3
1.3. Usporedba bežičnih i žičnih (krutih) medija za prijenos	3
1.4. Analogni i digitalni sustavi	5
1.5. Neke crtice iz povijesti razvoja bežičnih komunikacija	6
1.6. Zahtjevi na kvalitetu usluge	13
1.7. Osnovni parametri sustava	14
1.7.1. Ograničenje šumom	14
1.7.2. Brzina prijenosa, postizivi kapacitet kanala	22
1.7.3. Kvaliteta usluge	28
1.8. Bežične komunikacije – usluge	29
1.8.1. Radiodifuzija (prijenos “točka k više točaka”)	29
1.8.2. Selektivni poziv	29
1.8.3. Mobilna telefonija	30
1.8.4. Trunking radio	31
1.8.5. Bežična telefonija	32
1.8.6. Bežične lokalne mreže i osobne mreže	33
1.9. Prometna opteretivost mobilnih sustava	34
1.9.1. Uvod	34
1.9.2. Osnovne postavke prometne opteretivosti	37
1.9.3. Prometni modeli	38
1.9.4. Objedinjeni prometni resursi, trunking efekt	44
1.10. Pregled poglavlja	46
2. ELEKTROMAGNETSKI VAL, NEKA SVOJSTVA	47
2.1. Elektromagnetski val, osnovni pojmovi	47
2.1.1. Polarizacija elektromagnetskog vala	48
2.1.2. Ravni elektromagnetski val	51

2.1.3.	Rasprostiranje vala u sredstvu s gubitcima	53
2.2.	Pregled poglavlja	56
3.	ANTENE BAZNIH I MOBILNIH STANICA	57
3.1.	Bežično (zračno) sučelje	57
3.2.	Antene – osnovne karakteristike	58
3.2.1.	Antene – bliska i daleka zona zračenja	58
3.2.2.	Polarizacija antene	60
3.2.3.	Dijagram zračenja antene	60
3.2.4.	Usmjerenost	63
3.2.5.	Impedancija i dobitak antene	63
3.2.6.	Frekvencijski pojas	65
3.2.7.	Efektivna površina i duljina	65
3.2.8.	Temperatura šuma	66
3.2.9.	Mehanička svojstva antena baznih stanica	66
3.3.	Antene baznih stanica	66
3.3.1.	Postupci za optimiranje pokrivanja	70
3.3.2.	Antene dvostrukih polarizacija – polarizacijski diverziti	72
3.4.	Antene za prijenosne (mobilne) uređaje	74
3.4.1.	Izvedbeni problemi	75
3.5.	Pregled poglavlja	80
4.	RASPROSTIRANJE ELEKTROMAGNETSKOG VALA	81
4.1.	Prostor bez prepreka	82
4.1.1.	LOS primjer uz antene s dobitkom	86
4.2.	Rasprostiranje EM vala uz prisutnost prepreka	87
4.2.1.	Mehanizam refleksije	88
4.3.	Osnovni pojmovi rasprostiranja elektromagnetskog vala	94
4.3.1.	Ravni elektromagnetski val u prostoru – različiti slučajevi rasprostiranja	94
4.3.2.	Kosi upad vala na granicu dvaju dielektričnih sredstava (ravnina xy)	98
4.4.	Fresnelovi koeficijenti refleksije	102
4.4.1.	Okomita, TE polarizacija	103
4.4.2.	Paralelna, TM polarizacija	104
4.4.3.	Dielektrik s gubitcima, slučaj obje polarizacije	105
4.5.	Pregled poglavlja	110

5. OGIB, FRESNELOVA ZONA	111
5.1. Ogib (difrakcija) EM vala	111
5.1.1. Huygensovo načelo	111
5.2. Primjer s preprekom – model oštrice noža	115
5.2.1. Pobuda ravnim i sfernim valom	116
5.3. Problem modeliranja stvarnih i višestrukih prepreka	120
5.3.1. Model oštrice noža – slučaj višestruke refleksije	120
5.3.2. Modeli višestrukih prepreka	121
5.4. Ogib na objektima konačnih dimenzija i oblika	124
5.5. Fresnelova zona	129
5.6. Pregled poglavlja	133
6. PROPAGACIJSKI MODELI	135
6.1. Prigušenje EM vala uz prisustvo prepreka	135
6.2. Empirijski modeli	137
6.2.1. Okumura model	142
6.2.2. Okumura-Hata model	148
6.2.3. Prošireni COST 231-Hata model	150
6.2.4. Leejev model	150
6.2.5. Model Ibrahima i Parsona	153
6.3. Gradska makročelija	153
6.3.1. Walfisch-Bertoni model	154
6.3.2. Ikegami model	158
6.3.3. COST 231-Walfisch-Ikegami model	161
6.3.4. Makročelijski modeli – općeniti prikaz	163
6.4. Mikročelijski modeli	164
6.4.1. Uvod	164
6.4.2. Model dvojnog nagiba	166
6.4.3. Leejev mikročelijski model	171
6.5. Fizikalni, deterministički modeli	172
6.5.1. Model “lansiranja zrake”	172
6.5.2. Model “slijeđenja zrake”	174
6.5.3. LOS modeli	176
6.6. Pikočelijski modeli	185
6.6.1. Empirijski propagacijski modeli unutrašnjih prostora	185
6.7. Fizikalni modeli unutrašnjih prostora	192
6.7.1. Propagacija između katova	192
6.7.2. Propagacija na jednom katu	194

6.8.	Višestazni efekti u unutrašnjim prostorima	195
6.8.1.	Višestazni, grupni model	197
6.8.2.	Dodatni modeli	197
6.9.	Usporedba parametara nekih modela	199
6.10.	Pregled poglavlja	200
7.	VIŠESTAZNO ŠIRENJE EM VALA	201
7.1.	Prijamni signal u višestaznom kanalu – pristup preko EM vala	201
7.2.	Višestazni elektromagnetski val u prostoru	203
7.2.1.	Višestazni signali u ravnini xy	203
7.3.	Impulsni odziv kanala	205
7.3.1.	Općeniti pojmovi	206
7.4.	Parametri impulsnog odziva kanala	208
7.4.1.	Filtarski model kanala	208
7.5.	Deterministički modeli kanala	211
7.5.1.	Deterministički model radiokanala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni	211
7.5.2.	Slučaj dvije staze	219
7.6.	Općeniti filtarski model radiokanala	224
7.6.1.	Selektivno djelovanje kanala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni	225
7.7.	Mobilna stanica u gibanju	229
7.7.1.	Pristup Dopplerovu pomaku frekvencije preko kašnjenja fronte vala	229
7.7.2.	Spektar prijamnog signala prijarnika u pokretu	232
7.7.3.	Disperzija Dopplerova pomaka, koherencijsko vrijeme	236
7.8.	Širokopojasni model kanala	238
7.8.1.	Standardizirani impulsni modeli kanala	241
7.8.2.	Saleh-Valenzuelin i Δ -K model	242
7.9.	Pregled poglavlja	244
8.	FEDING	245
8.1.	Uvod	245
8.2.	Spori feding (Gaussov, feding velikih pomaka)	246
8.2.1.	Pokriivanje područja korisnim signalom, pojave na rubu ćelije	253
8.2.2.	Pokriivanje površine ćelije	260
8.3.	Feding malih pomaka (brzi feding)	264
8.3.1.	Rayleighova raspodjela	265

8.3.2.	Riceova raspodjela	277
8.3.3.	Nakagamiyjeve raspodjele	285
8.3.4.	Složene, miješane raspodjele	288
8.4.	Feding uz višestazno širenje vala	290
8.4.1.	Ravni, (frekvencijski glatki) feding	291
8.4.2.	Frekvencijski selektivni feding	292
8.4.3.	Usporedba uskopojasnih i širokopojasnih sustava	294
8.5.	Statistika drugog reda mobilnog kanala	296
8.5.1.	Frekvencija prolaska signala ovojnice nekom referentnom razinom	297
8.5.2.	Prosječno trajanje fedinga	300
8.6.	Pregled poglavlja	302
9.	AWGN RADIOKANAL	303
9.1.	Model AWGN kanala	303
9.2.	Kriteriji odlučivanja prilikom detekcije prijamnog signala	305
9.3.	Postupci obrade signala u prijamu	306
9.3.1.	AWGN binarni kanal	308
9.3.2.	Prilagođeni filter	312
9.3.3.	Detekcija binarnog signala u AWGN kanalu – koherencijski slučaj	315
9.4.	Pogreška detekcije bita – BER	319
9.4.1.	Odnos signala prema šumu, odnos energije bit/simbol prema šumu	319
9.5.	BER moduliranih signala u AWGN kanalu	321
9.5.1.	Geometrijski prikaz moduliranog signala	321
9.5.2.	Diskretna modulacija faze	322
9.6.	Izjednačivanje u vremenskoj domeni	330
9.6.1.	Linearni izjednačivači	331
9.7.	Pregled poglavlja	336
10.	SIGNALI, SPEKTRI, MODULACIJE	337
10.1.	Prijenos impulsa kanalom	338
10.1.1.	Neki formati slijeda impulsa u osnovnom pojasu	338
10.2.	Spektar digitalno moduliranog signala	340
10.2.1.	Neke definicije vezane uz frekvencijski pojas	340
10.3.	Spektar gustoće snage pojedinih signalizacija	344
10.3.1.	NRZ linijski kôd	345

10.3.2. RZ linijski kôd	348
10.4. Intersimbolna interferencija (ISI)	352
10.4.1. Nyquistov kriterij	354
10.5. Oblikovanje impulsa u vremenskoj domeni	355
10.5.1. Kosinus kvadrat filtar	356
10.6. Geometrijski prikaz signala	359
10.7. Tipične modulacije u mobilnim sustavima	361
10.7.1. Diskretne modulacije faze	362
10.8. OFDM	371
10.8.1. Uvod	371
10.9. Osnove OFDM tehnike	373
10.9.1. Sustavi s više nosilaca	373
10.9.2. Matematički prikaz signala u OFDM sustavima	375
10.9.3. Posljedice višestaznog širenja	376
10.9.4. Blok shema OFDM sustava	378
10.10. Osvrt na izbor nekih modulacijskih postupaka, uz pregled pripadajućih parametara	380
10.11. Energetska učinkovitost	380
10.12. Spektralna učinkovitost	381
10.13. Pregled poglavlja	382

11. DEMODULACIJA, UTJECAJ KANALA NA DETEKTIRANI SIGNAL 383

11.1. Uvod	383
11.1.1. Primjer AWGN kanala	385
11.2. Izobličenje signala u prijenosu kanalom	386
11.2.1. Izobličenje zbog djelovanja neidealne amplitudne i fazne karakteristike kanala	387
11.2.2. Grupno kašnjenje i nelinearno izobličenje faze	388
11.3. BER u bežičnom kanalu, utjecaj fedinga	390
11.3.1. Vjerojatnost pogreške u kanalu s fedingom	391
11.3.2. Vjerojatnost gubitka veze	396
11.4. Neki dodatni negativni utjecaji kanala na korisni signal	397
11.4.1. Dopplerova disperzija, pojam nepopravljive pogreške u prijamu	397
11.4.2. Utjecaj frekvencijski selektivnoga fedinga i istokanalne interferencije	400
11.5. Pregled poglavlja	402

12. DIVERZITI	403
12.1. Uvod	403
12.2. Prijamnički mikrodiverziti	405
12.3. Mikrodiverziti – kriteriji uspješnoga kombiniranja signala	408
12.4. Prostorni diverziti	409
12.4.1. Osnovni model	409
12.4.2. Prostorni diverziti mobilne stanice	411
12.5. Prostorni diverziti – obrada signala pojedinih grana	414
12.6. Tehnike kombiniranja kod diverziti prijama	415
12.6.1. Preddetekcijsko i postdetekcijsko kombiniranje signala	416
12.6.2. Seleksijski diverziti	417
12.6.3. Seleksijski diverziti s M grana	418
12.6.4. Kombiniranje M grana s maksimalnim dobitkom kombiniranja	424
12.6.5. Kombiniranje M grana s jednakim dobitkom	427
12.6.6. Dobitci mikrodiverzitija	430
12.7. Pregled poglavlja	431
13 VIŠEANTENSKI SUSTAVI	433
13.1. Uvod	433
13.2. MIMO sustavi	434
13.2.1. SISO	435
13.2.2. SIMO	435
13.2.3. MISO	436
13.3. MIMO sustavi	440
13.3.1. Struktura i kapacitet MIMO sustava	441
13.3.2. Kapacitet MIMO kanala	446
13.4. Pregled poglavlja	450
14. SUSTAVI S VIŠESTRUKIM PRISTUPOM	451
14.1. Uvod	451
14.2. Vrste protoka informacije, organizacija kanala u spektru	452
14.2.1. Dupleksni sustavi	453
14.2.2. Simpleksni sustavi	455
14.3. Višestruki pristup	456
14.3.1. Višestruki pristup po frekvenciji – FDMA	457
14.3.2. Višestruki pristup po vremenu – TDMA	459
14.4. Osnove sustava s proširenim spektrom	463
14.4.1. Sustavi s izravnim slijedom	464

14.4.2. Sustavi s frekvencijskim skakanjem	466
14.4.3. Višestruki pristup po kodu – CDMA	467
14.4.4. RAKE prijamnik	476
14.5. Višestruki pristup, pojam frekvencijske učinkovitosti i kapaciteta	479
14.5.1. Kapacitet ćelijskih sustava općenito	479
14.5.2. Ograničenja sustava s proširenim spektrom	482
14.5.3. Višestruki pristup po položaju – SDMA	486
14.5.4. Slučajni višestruki pristupi	488
14.6. Pregled poglavlja	492
15. ĆELIJSKA KONCEPCIJA – OSNOVA MOBILNOG SUSTAVA	493
15.1. Uvod	493
15.2. Ćelije, grozdovi i ponavljanje frekvencija	494
15.2.1. Ćelijska hijerarhija	496
15.3. Osnove ćelijskih sustava	497
15.3.1. Prikaz ćelija u kosokutnom koordinatnom sustavu	499
15.3.2. Rubna pobuda ćelija	505
15.4. Istokanalna interferencija, sektoriranje ćelija	507
15.4.1. Sektoriranje ćelije	510
15.4.2. Interferencija u ćelijskim sustavima, problem susjednoga kanala	513
15.5. Mikroćelijske alternativne strukture	519
15.6. Postupci povećanja kapaciteta ćelijskog sustava	521
15.6.1. Dijeljenje ćelija	521
15.6.2. Preklapanje ćelija	523
15.7. Tehnike pridruživanja kanala	524
15.7.1. Fiksno pridruživanje kanala (FCA)	525
15.7.2. Posuđivanje kanala	525
15.7.3. Dinamičko pridruživanje kanala (DCA)	526
15.8. Prekapčanje veze	528
15.8.1. Tvrdoprekapčanje	529
15.8.2. Mekoprekapčanje	529
15.9. Procesi i parametri prekapčanja veze	530
15.9.1. Algoritmi prekapčanja veze	531
15.9.2. Strategije prekapčanja veze	533
15.10. Pregled poglavlja	534

16. DODATCI	535
A. Šum	535
A.1. Termički šum	535
A.2. Pojam bijelog šuma	538
A.3. Filtrirani bijeli šum	540
B. Kosi upad elektromagnetskog vala na granicu dvaju sredstava	542
B.1. Okomita (TE) polarizacija	542
B.2. Paralelna (TM) polarizacija	546
C. Model oštice noža	551
C.1. Fresnelov parametar	551
C.2. Cornuova spirala	555
C.3. Pobuda ravnim valom	557
C.4. Fresnelov integral	560
D. Model dvije zrake	562
D.1. Model dvije zrake – izraz za daleku zonu	562
E. Modeli ogiba na objektima konačnih dimenzija i oblika	565
E.1. Ogib na klinu – prepreka oštih rubova	565
E.2. Ogib na valjkastoj prepreci	573
F. Posebni slučajevi mobilnosti odašiljača (BS) i prijarnika (MS)	577
F.1. Stacionarni odašiljač (BS), pokretni prijarnik (MS)	577
F.2. MS i BS stacionarni, objekt raspršivača u gibanju	579
G. Deterministički signali, kratki repetitorij	581
G.1. Osnovni oblici determinističkih signala, kontinuiranih i diskretnih	581
G.2. Deterministički signali, prikaz nekih posebnih signala	582
G.3. Linearni sustavi	587
G.4. Pojasnopropusni signali, kompleksna ovojnica	590
G.5. Analitički signal	594
H. Stohastički signali, kratki repetitorij	600
H.1. Slučajne varijable	600
I. Standardizirani modeli kanala COST 207, COST 259	607
I.1. COST 207 GSM model	607
I.2. COST 259	610
I.3. Ostale vrste standardnih modela	612
J. Erlang B model – ponuđeni promet za 80 kanala uz vjerojatnost blokiranja $p(B)$	613
K. Neki matematički identiteti i oznake	616

L. Parovi i teoremi Fourierove transformacije	731
L.1. Parovi Fourierove transformacije	623
L.2. Fourierovi transformacijski teoremi	625
Popis slika	627
Popis tablica	645
Kratice	647
Pregled nekih varijabli po poglavljima	651
Literatura	659
Kazalo pojmova	671