

Aleksandar Nešković

# **RADIO KOMUNIKACIJE**

Akademski misao  
Beograd, 2015.

Aleksandar Nešković

**RADIO KOMUNIKACIJE**

*Recenzenti*

Dr Đorđe Paunović

Dr Predrag Ivaniš

*Izdaje i štampa*

AKADEMSKA MISAO, Beograd

*Dizajn naslovne strane*

Zorica Marković, akademski slikar

*Tiraž*

200 primeraka

ISBN 978-86-7466-544-2

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. ISTORIJA .....	1
1.2. REGULATORNA TELA .....	2
1.3. PREGLED SADRŽAJA KNJIGE.....	3
<b>2. OSNOVNI POJMOVI</b> .....	<b>5</b>
2.1. RADIO SPEKTAR.....	5
2.1.1. Nomenklatura frekvencijskih opsega .....	5
2.1.2. Korišćenje spektra .....	8
2.2. OSNOVNI PARAMETRI ANTENSKIH SISTEMA .....	11
2.2.1. Dijagram zračenja antene .....	11
2.2.2. Direktivnost antene.....	15
2.2.3. Dobitak antene.....	15
2.2.4. Polutalasi dipol kao referentna antena.....	16
2.2.5. Realno ostvarivi dobitak .....	16
2.2.6. Efektivna površina antene .....	17
2.2.7. Impedansa antene .....	18
2.2.8. Nominalna impedansa .....	18
2.2.9. Neprilagođenje antene i VSWR .....	18
2.2.10. Propusni opseg antene .....	20
2.2.11. Polarizacija antene.....	21
2.2.12. Teorema reciprociteta.....	21
2.2.13. Električni tilt.....	21
2.3. ANTENSKI VODOVI .....	23
2.4. OSNOVNI PARAMETRI JEDNOSTAVNOG RADIO SISTEMA .....	23
2.2. OSNOVNI MEHANIZMI PROSTIRANJA.....	28
<b>3. FEDING</b> .....	<b>30</b>
3.1. KRATKOTRAJNI FEDING .....	30
3.1.1. Prostiranje po višestrukim putanjama i kratkotrajni feding .....	30
3.1.1.1. Faktori koji utiču na kratkotrajni feding .....	31
3.1.1.2. Doplerov pomeraj.....	32

3.1.2. Impulsni odziv radio kanala .....	33
3.1.3. Merjenja efekata kratkotrajnog fedinga.....	34
3.1.3.1. Merenje direktnim RF impulsom.....	34
3.1.3.2. Merenje kliznim korelatorom u tehnici proširenog spektra .....	35
3.1.3.3. Merenje impulsnog odziva prebrisavanjem spektra.....	38
3.1.4. Parametri radio kanala.....	39
3.1.4.1. Parametri stacionarnog radio kanala.....	39
3.1.4.2. Doplerovo širenje i vreme koherencije.....	43
3.1.5. Tipovi kratkotrajnog fedinga.....	44
3.1.5.1. Efekti do kojih dovodi feding uzrokovan vremenskom disperzijom kašnjenja .....	44
3.1.5.2. Efekti do kojih dovodi feding uzrokovan Doplerovim širenjem .....	48
3.2 DUGOTRAJNI FEDING .....	49
3.2.1. Merenje nivoa električnog polja.....	50
3.2.1.1. Određivanje širine kliznog prozora za usrednjavanje.....	51
3.2.1.2. Određivanje potrebnog broja nekorelisanih uzoraka .....	53
3.3. RASPODELE VEROVATNOĆE KARAKTERISTIČNE ZA PROSTIRANJE RADIO TALASA .....	53
3.3.1. Raspodela verovatnoće - opšte .....	54
3.3.2. Normalna (Gauss-ova) raspodela.....	54
3.3.3. Log-normalna raspodela.....	56
3.3.4. Rayleigh-jeva raspodela.....	58
3.3.5. Kombinovana log-normalna i Rayleigh-jeva raspodela .....	60
3.3.6. Rice-ova raspodela.....	60
3.3.7. Ostale raspodele verovatnoće.....	61

#### **4. PROPAGACIJA ELEKTROMAGNETNIH TALASA ..... 63**

4.1. MAXWELL-OVE JEDNAČINE .....	63
4.2. SFERNI I RAVANSKI RADIO TALAS.....	66
4.2.1. Zone zračenja antene .....	66
4.3. POLARIZACIJA RADIO TALASA .....	68
4.4. PROPAGACIJA U SLOBODNOM PROSTORU.....	70
4.4.1. Zavisnost intenziteta električnog polja od rastojanja .....	70
4.4.2. Snaga signala na prijemu.....	71
4.4.3. Veza između intenziteta električnog polja i napona na ulazu u prijemnik.....	72
4.5. POJAM FRESNEL-OVE ZONE .....	73
4.6. REFRAKCIJA.....	76
4.6.1. Sub-normalna atmosfera.....	80
4.6.2. Super-normalna atmosfera.....	80
4.7. KOREKCIJA PROFILA TERENA USLED ZAKRIVLJENJA ZEMLJINE POVRŠINE.....	81
4.8. REFLEKSIJA .....	82
4.8.1. Rayleigh-ev kriterijum glatkosti.....	87
4.9. PROSTIRANJE IZNAD „RAVNE” ZEMLJE .....	88
4.10. DIFRAKCIJA .....	91
4.10.1. Difrakcija na „oštrici noža”.....	93
4.10.1.1. Difrakcija na prepreci konačne debljine.....	97

4.10.1.2. Difrakcija na dve usamljene prepreke.....	98
4.10.1.3. Difrakcija na višestrukim preprekama .....	100
4.10.2. Difrakcija na usamljenoj cilindričnoj prepreci .....	102
4.10.2.1. Višestruki izolovani cillindri.....	104
4.10.3. Difrakcija na sferičnoj Zemlji .....	107
4.10.3.1. Uticaj električnih karakteristika površine Zemlje .....	107
4.10.3.2. Proračun slabljenja usled difrakcije .....	108
<b>5. RADIO ŠUM.....</b>	<b>111</b>
5.1. IZVORI RADIO ŠUMA .....	111
5.2. PARAMETRI KOJIMA SE OPISUJE INTENZITET ŠUMA .....	112
5.3. NIVO EKSTERNOG ŠUMA U ZAVISNOSTI OD FREKVENCIJE .....	113
5.4. INTERFERENCIJSKE KARAKTERISTIKE PROPAGACIONE SREDINE .....	115
<b>6. PREDIKCIJA NIVOA ELEKTRIČNOG POLJA U MAKROĆELIJI .....</b>	<b>117</b>
6.1. BAZE PODATAKA O NAČINU KORIŠĆENJA ZEMLJIŠTA (CLUTTER BAZE) .....	119
6.1.1. Uvod .....	119
6.1.2. Clutter baza za celokupnu teritoriju Republike Srbije rezolucije 50×50m.....	120
6.1.3. Clutter baza za teritoriju grada Beograda rezolucije 20×20 m.....	124
6.1.4. Clutter baza za teritoriju grada Beograda rezolucije 5×5 m.....	126
6.2. POPULARNI MODELI PREDIKCIJE NIVOA ELEKTRIČNOG POLJA U MAKROĆELIJI (OSNOVNE KARAKTERISTIKE, PREDNOSTI I NEDOSTACI) .....	128
6.2.1. Okumura model.....	128
6.2.2. Ericsson model 9999 .....	129
6.2.3. Lee model .....	130
6.2.4. COST 231-Walfisch-Ikegami model .....	131
6.3. ITU-R P. 1546-5 MODEL.....	132
6.3.1. Uvod .....	132
6.3.2. Propagacione krive .....	132
6.3.3. Propagacione krive za frekvencijski opseg od 30 MHz do 300 MHz.....	134
6.3.4. Propagacione krive za frekvencijski opseg od 300 MHz do 1000 MHz. 136	
6.3.5. Propagacione krive za frekvencijski opseg od 1000 MHz do 3000 MHz.136	
6.3.6. Faze proračuna i uticaj pojedinih faktora na krive medijane polja.....	139
6.3.6.1. Maksimalne vrednosti nivoa električnog polja.....	139
6.3.6.2. Određivanje efektivne visine predajno/bazne antene $h_1$ .....	139
6.3.6.3. Interpolacija nivoa električnog polja kao funkcije rastojanja.....	142
6.3.6.4. Interpolacija i ekstrapolacija nivoa električnog polja kao funkcije frekvencije .....	142
6.3.6.5. Interpolacija nivoa električnog polja kao funkcije procenta vremena .....	143
6.3.6.6. Korekcija za visinu prijemne/mobilne antene.....	144
6.3.6.7. Korekcija za način korišćenja zemljišta na lokaciji predajnika ..	145

6.3.6.8. Korekcija za ugao vidljivosti (engl. clearance angle).....	145
6.3.6.9. Korekcija za procenat lokacija.....	146
6.3.6.10. Korekcija za razliku visina predajne i prijemne antene.....	149
6.3.6.11. Propačun intenziteta električnog polja za trase kraće od 1 km ..	150
6.3.6.12. Aproksimacija inverzne komplementarne kumulativne normalne funkcije raspodele.....	151
6.3.6.13. Uticaj promene snage radio predajnika.....	152
6.3.7. Algoritam za primenu metoda ITU-R P.1546.....	153
6.3.8. Numeričke metode za očitavanje vrednosti nivoa električnog polja iz familije propagacionih krivih .....	155
6.4. PROPAGACIONI MODEL ITU-R P. 528-3 .....	157
6.4.1. Uvod.....	157
6.4.2. Razvoj i primena propagacionih krivih.....	158
6.4.3. Definicija krivih.....	159
6.5. ANN MODEL .....	161
6.5.1. Veštačke neuralne mreže (ANN).....	161
6.5.1.1. Uvod.....	161
6.5.1.2. Model računarskog neurona.....	161
6.5.1.3. Arhitektura ANN mreže.....	162
6.5.1.4. Pravilo učenja.....	163
6.5.1.5. Izbor pogodne arhitekture ANN mreže sa stanovišta rešavanja problema predikcije nivoa električnog polja.....	163
6.5.1.6. Adaptivne neuralne mreže sa više nivoa („Multilayer Feedforward Networks”) .....	164
6.5.2. Struktura ANN modela za predikciju nivoa električnog polja u makročeliji.....	165
6.5.3. Realizacija ANN modela.....	169
6.5.4. Verifikacija ANN modela.....	170
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>173</b>

# 1. UVOD

## 1.1. ISTORIJA

Praktično je nemoguće reći kada tačno počinje istorija radio komunikacija. Prvi naučnici koji su uočavali i istraživali efekte elektriciteta i magnetizma često nisu razumeli u potpunosti efekte prouzrokovane prostiranjem elektromagnetne energije.

Prvi naučnik koji je pokazao postojanje elektromagnetnih talasa bio je *James Clerk Maxwell*. On je postojanje elektromagnetnih talasa dokazao matematički, a svoja istraživanja objavio je u velikom broju radova publikovanih u periodu od 1864. do 1873. godine.

1887. nemački fizičar *Heinrich Rudolph Hertz* (1857-1894) eksperimentalno je dokazao postojanje elektromagnetnih talasa. *Hertz-ov* predajnik je radio po principu punjenja kondenzatora i njegovog kratkospajanja. Generisana varnica emitovala je elektromagnetni talas. *Hertz* je mogao da izmeri talasnu dužinu i brzinu elektromagnetnog talasa. Pri tome je utvrdio da je njihova brzina jednaka brzini svetlosti kao što je predviđala *Maxwell-ova* teorija. Iako su pre *Hertz-a* mnogi uočili pojedine efekte, niko nije zapravo suštinski objasnio uočenu pojavu. U prvo vreme radio talasi su se nazivali „*Hertz-ovi* talasi”.

1894. konstruisan je tzv. „*coherer*” – prvi praktičniji prijemnik kojim je bilo moguće detektovati emisiju predajnika sa varnicom. *Coherer* je izumeo francuski naučnik *Edouard Branly*, a njegovo popularisanje obavio je *Sir Oliver Lodge*.

1895. *Guglielmo Marconi* (1874-1937), italijanski elektroinženjer, osmislio je prve praktične realizacije radio veza. Uspešno usavršavajući tuđe i svoje pronalaskе, inicijalno je uspevao da radio talasima premosti rastojanja od svega nekoliko metara, a kasnije i do nekoliko kilometara. Interesantno je reći da *Marconi* danas slovi za pionira modernih radio komunikacija, iako su sudskom presudom Vrhovnog suda Sjedinjenih Američkih Država 1943. godine njegovi osnovni patenti u oblasti radio komunikacija vraćeni Nikoli Tesli koji je slične patente prijavio još 1893. godine.

1898. bežična telegrafija se po prvi put koristi u pomorskim manevrima – domet oko 90 km.

1899. realizovana je radio komunikacija između Engleske i Francuske.

1901. ostvarena je prva transatlantska radio komunikacija.

1904. pronađena je dioda – *Ambrose Fleming*.

1906. realizovana je trioda – *de Forest*.

1912. počela je primena triode kao pojačavačkog elementa.

1918. realizovan je superheterodinski princip – *Edwin Armstrong*.

1920. započelo je prvo emitovanje zvučnog radio difuznog programa (*Marconi Company*).

1921. počinje sa radom prvi sistem mobilne radio telefonije.

1925. počinje međunarodna radio difuzija.

- 1934. započinje zvučna FM radio difuzija - *Edwin Armstrong*.
- 1934. izvršena je demonstracija TV prenosa (u Londonu).
- 1946. ustanovljen je prvi sistem mobilne telefonije u kolima.
- 1960. podignut je u orbitu prvi pasivni telekomunikacioni satelit *Echo I*.
- 1981. započela je sa radom prva savremena mobilna čelijska radio mreža.
- 1998. pojavili su se prvi ručni satelitski telefoni.

## 1.2. REGULATORNA TELA

Uspeh i globalna rasprostranjenost današnjih radio komunikacionih, kao i uopšteno telekomunikacionih sistema, u velikoj meri počiva na standardizaciji. Na globalnom nivou postoji veći broj tela koja se bave standardizacijom, tehničkom i pravnom regulativom. Bez ulaženja u detalje, u nastavku su pobrojana najvažnija standardizaciona tela iz oblasti telekomunikacija i radio komunikacija.

**ITU** – *International Telecommunication Union* sa sedištem u Ženevi, Švajcarska, je međunarodna organizacija u okviru sistema Ujedinjenih Nacija u okviru koje vlade država članica i privatni sektor koordiniraju razvoj i implementaciju telekomunikacionih mreža i servisa na globalnom nivou. U okviru ITU organizacije kao celine, problematikom radio komunikacija bavi se ITU-R (*International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector*) koji predstavlja centralno telo za poslove radio komunikacija.

**ITU-R** – Osnovan je 1927. godine na međunarodnoj konferenciji u *Washington*-u pod nazivom *International Radio Consultative Committee* (CCIR). U okviru ITU-R-a propisuju se tehničke karakteristike zemaljskih i satelitskih bežičnih servisa i sistema, kao i operacione procedure za njihovu implementaciju. Takođe, ITU-R pokreće važne tehničke studije koje služe kao osnova za formulisanje administrativnih i tehničkih regulativa koje se usvajaju na međunarodnim radio komunikacionim konferencijama. Usvojena regulativa se publikuje u formi tzv. ITU-R preporuka (eng. *ITU-R recommendations*) i izveštaja (eng. *ITU-R reports*).

**ETSI** – *European Telecommunications Standards Institute* ima izraženu ulogu u postavljanju standarda na teritoriji Evrope, ali i znatno šire, u oblasti informaciono-komunikacionih tehnologija, uključujući fiksne, mobilne, bežične, difuzne i internet tehnologije. Primera radi, ETSI je postavio GSM (eng. *Global System for Mobile Communications*) standard, praktično prvi opšteprihvaćeni globalni standard u oblasti javnih mobilnih komunikacija. Okuplja preko 750 članova iz 64 zemlje sa 5 kontinenata.

**IEEE** – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, predstavlja najmasovnije udruženje elektroinženjera na planeti (preko 430 000 pojedinačnih članova u više od 160 zemalja). IEEE izdaje oko 30% ukupne godišnje svetske literature u oblasti elektrotehnike, računarstva i automatike, organizuje godišnje nekoliko stotina konferencija, postavlja standarde (oko 900 usvojenih standarda i oko 500 standarda u fazi realizacije).

**IEC** – *International Electrotechnical Commission* je vodeća globalna organizacija koja priprema i publikuje međunarodne standarde u oblasti elektrotehnike. Ovi standardi predstavljaju osnovu za nacionalnu standardizaciju i kao referenca u slučajevima međunarodnih tendera i ugovora.

**FCC** – *Federal Communications Commission* je nezavisna agencija vlade Sjedinjenih Američkih Država direktno odgovorna Kongresu. FCC je osnovan 1934. godine, a osnovna delatnost mu je regulisanje međudržavnih i internacionalnih aktivnosti u oblasti radio komunikacija, televizije, žičanih komunikacija, satelitskih veza i kablovske distribucije.



**Institut za standardizaciju Srbije** – Nacionalno telo za standardizaciju u Republici Srbiji. Institut za standardizaciju donosi standarde i srodne dokumente koje se označavaju oznakom koja počinje skraćenicom SRPS.

### 1.3. PREGLED SADRŽAJA KNJIGE

U okviru glave 2 razmotreni su osnovni pojmovi. Svi radio komunikacioni servisi realizuju se u širokom opsegu talasnih dužina, odnosno frekvencija. Iz tog razloga, na samom početku navodi se međunarodno usvojena podela radio frekvencijskog spektra. Da bi se stekla opšta slika o načinu korišćenja pojedinih frekvencijskih opsega, u nastavku je dat osnovni pregled načina korišćenja, karakteristika radio sistema, kao i karakteristike propagacije radio talasa u pojedinim frekvencijskim opsezima. Jedan od najznačajnijih elemenata svakog radio sistema jeste antena. Osnovni parametri antenskih sistema su razmotreni na nivou osnovnih definicija dovoljnih za razumevanje izlaganja u nastavku knjige. Na nivou osnovnih pojmova, posebno se razmatra i opšta blok šema elementarnog radio sistema. Cilj ovog razmatranja je da se definišu osnovni parametri (snaga napajanja antene, efektivna zračena snaga, osetljivost prijemnika ...). Na kraju poglavlja razmatraju se osnovni mehanizmi prostiranja radio talasa sa ciljem da se ukaže na kompleksnost ovih fenomena, kao i na izrazitu nestabilnost nivoa električnog polja na prijemu.

Nestabilnost signala na prijemu označava se kao „feding” i ona je detaljno razmotrena u glavi tri. Posebno su opisani uzroci i karakteristike tzv. kratkotrajnog fedinga, a posebno dugotrajnog. I u jednom i u drugom slučaju prikazani su i postupci merenja. Za slučaj kratkotrajnog fedinga definisani su osnovni parametri radio kanala, a u zavisnosti od njihovih vrednosti, data je osnovna klasifikacija tipova fedinga. S obzirom na veliku nestabilnost signala na prijemu, prilikom opisivanja ponašanja radio signala intenzivno se koristi teorija verovatnoće. Iz tog razloga, na kraju glave tri, posebno su razmotrene raspodele verovatnoće koje su karakteristične za prostiranje radio talasa.

U okviru glave 4 razmatraju se mehanizmi prostiranja elektromagnetnih talasa. Polazeći od *Maxwell*-ovih jednačina, definišu se pojmovi sfernog i ravanskog talasa, kao i polarizacija radio talasa. Sa stanovišta propagacije radio talasa prvo se razmatra jednostavna propagacija u tzv. slobodnom prostoru. Nakon toga, uvodi se pojam *Fresnel*-ovih zona kao kriterijum za utvrđivanje da li neka konkretna radio veza može da se posmatra i proračunava kao da se odvija u slobodnom prostoru. Za razliku od osnovnog školskog učenja po kome se svetlost, pa i radio talasi, uvek prostiru pravolinijski, u nastavku se pokazuje da to pod izvesnim uslovima nije tako. Naime, uvodi se pojam refrakcije, fenomena kojim se objašnjava pojava krivolinijskog prostiranja radio talasa u troposferi. U nastavku se razmatra mehanizam refleksije radio talasa, kao i kriterijumi na osnovu kojih se za neku površinu može utvrditi da li je ona, sa stanovišta refleksije radio talasa, glatka ili ne. Konačno, na kraju ovog poglavlja, detaljno se razmatra problem difrakcije na preprekama i neregularnom terenu. Predstavljeno je više standardnih pristupa za modelovanje, kako usamljenih, tako i višestrukih prepreka.

Fenomen koji je podjednako važan kao i propagaciono slabljenje, i koji direktno utiče na kvalitet veze i ograničava njen domet, jeste šum. Ovo stoga što karakteristike radio sistema suštinski zavise od ostvarenog odnosa signal/šum na ulazu u prijemnik, a ne samo od nivoa signala na prijemu. Generealno, razlikuju se dve vrste radio šuma: interni i eksterni šum. Peta glava posvećana je problematici eksternog šuma koji se generiše u radio kanalu.

S obzirom na veliku složenost propagacionih mehanizama, u praksi se problem predikcije nivoa električnog polja veoma često realizuje korišćenjem tzv. „propagacionih modela”. Kao što im samo ime kaže, „model” je manje ili više dobra aproksimacija stvarnih mehanizama propagacije. U glavi 6 razmatraju se propagacioni modeli za makroćelijska

okruženja. Pre opisa samih modela, razmotrene su baze podataka na kojima se danas, tipično, primenjuju propagacioni modeli za makroćeliju. U literaturi se može naći veliki broj ovih modela. U okviru ove knjige su izložene osnovne karakteristike, prednosti i nedostaci nekoliko modela predikcije nivoa električnog polja u uslovima makroćelije koji se danas često koriste u inženjerskoj praksi. Ukratko su opisani modeli: *Okumura*, *Ericsson 9999*, *Lee* i *COST 231-Walfisch-Ikegami*. Dosta detaljno, prikazani su ITU-R modeli P.1546-5 i P.528-3. ITU-R P.1546-5 je propagacioni model tipa tačka-više tačaka namenjen predikciji nivoa električnog polja za slučaj zemaljskih servisa u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 3000 MHz. Sa druge strane, ITU-R P.528-3 je model za mobilne aeronautičke i radionavigacione sisteme u VHF, UHF i SHF opsezima. U današnjoj primeni, u okviru propagacionih modela sve više se koriste savremeni optimizacioni postupci. Kao jedan od primera primene, na kraju glave 6, detaljno je razmotren makroćelijski model koji se bazira na primeni veštačkih neuralnih mreža (ANN makroćelijski model).

## 2. OSNOVNI POJMOVI

### 2.1. RADIO SPEKTAR

#### 2.1.1. NOMENKLATURA FREKVENCIJSKIH OPSEGA

Elektromagnetni talasi se mogu prostirati u izuzetno širokom opsegu talasnih dužina, odnosno frekvencija. Generalno, smatra se da radio spektar obuhvata opseg frekvencija između 3 kHz i 3 THz, iako se danas praktično koristi samo opseg od 9 kHz do 275 GHz, koji je jedino i pokriven međunarodnom ITU (*International Telecommunication Union*) regulativom.

Uobičajena, međunarodno usaglašena, nomenklatura radio spektra data je u okviru tabele 2.1. Dodatno, u velikom broju zemalja frekvencijski opsezi koji se koriste za FM i TV radio difuziju označavaju se rimskim brojevima od I do V. Oznake i odgovarajući frekvencijski opsezi dati su u okviru tabele 2.2. Posebno treba naglasiti da ovi opsezi, u pojedinim slučajevima, nisu ekskluzivno dodeljeni radio difuznim servisima. Takođe, za potrebe radarskih i satelitskih sistema uvedene su slovne oznake za pojedine frekvencijske opsege (tabela 2.3).

TABELA 2.1. Nomenklatura frekvencijskih opsega

NUMERIČKA OZNAKA OPSEGA	OZNAKA I PUN NAZIV OPSEGA	FREKVENCIJSKI OPSEG*	METRIČKA PODELA
-1 0 1 2	ELF ( <i>Extremely Low Frequency</i> )	0.03-0.3 Hz 0.3-3 Hz 3-30 Hz 30-300 Hz	Gigametarski talasi Hektomegametarski talasi Dekametarski talasi Megametarski talasi
3	ULF ( <i>Ultra Low Frequency</i> )	300-3 000 Hz	Hektokilometarski talasi
4	VLF ( <i>Very Low Frequency</i> )	3-30 kHz	Miriametarski talasi (vrlo dugi talasi)
5	LF ( <i>Low Frequency</i> )	30-300 kHz	Kilometarski talasi (dugi talasi)
6	MF ( <i>Medium Frequency</i> )	300-3 000 kHz	Hektometarski talasi (srednji talasi)
7	HF ( <i>High Frequency</i> )	3-30 MHz	Dekametarski talasi (kratki talasi)
8	VHF ( <i>Very High Frequency</i> )	30-300 MHz	Metarski talasi (ultra kratki talasi)
9	UHF ( <i>Ultra High Frequency</i> )	300-3 000 MHz	Decimetarski talasi (ultra kratki talasi)
10	SHF ( <i>Super High Frequency</i> )	3-30 GHz	Centimetarski talasi
11	EHF ( <i>Extremely High Frequency</i> )	30-300 GHz	Milimetarski talasi
12	-	300-3 000 GHz	Decimilimetarski talasi
13	-	3-30 THz	Centimilimetarski talasi
14	-	30-300 THz	Mikrometarski talasi
15	-	300-3 000 THz	Decimikrometarski talasi

\* donja granica pripada prethodnom opsegu

**TABELA 2.2.** Označavanje frekvenzijskih opsega za radio difuzne servise (u pojedinim zemljama)

OZNAKA	FREKVENCIJSKI OPSEG [MHz]		
	REGION 1*	REGION 2	REGION 3
I	47-68	54-68	47-68
II	87.5-108	88-108	87-108
III	174-230	174-216	174-230
IV	470-582	470-582	470-582
V	582-960	582-890	582-960

\* Srbija pripada regionu 1

**TABELA 2.3.** Označavanje nekih frekvenzijskih opsega za potrebe radarskih i satelitskih sistema

SLOVNA OZNAKA	RADARSKI SISTEMI		SATELITSKI SISTEMI	
	FREKVENCIJSKI OPSEG [GHz]	PRIMER [GHz]	NOMINALNA OZNAKA	PRIMER [GHz]
L	1-2	1.215-1.4	1.5 GHz	1.525-1.710
S	2-4	2.3-2.5 2.7-3.4	2.5 GHz	2.5-2.690
C	4-8	5.25-5.85	4/6 GHz	3.4-4.2 4.5-4.8 5.85-7.075
X	8-12	8.5-10.5	-	-
Ku	12-18	13.4-14.0 15.3-17.3	11/14 GHz 12/14 GHz	10.7-13.25 14.0-14.5
K <sup>*</sup>	18-27	24.05-24.25	20 GHz	17.7-20.2
Ka <sup>*</sup>	27-40	33.4-36.0	30 GHz	27.5-30.0

\* u slučaju satelitskih sistema opsezi K i Ka se često označavaju jedinstvenim simbolom Ka

### 2.1.2. KORIŠĆENJE SPEKTRA

Da bi se stekla opšta slika o načinu korišćenja frekventijskog spektra, korisno je napraviti osnovni pregled u pogledu toga koji se tipični servisi koriste, kakve su karakteristike radio sistema koji se realizuju, kao i kakve su osnovne karakteristike propagacije radio talasa u pojedinim frekventijskim opsezima. Pregled je dat u odnosu na međunarodno usaglašenu nomenklaturu radio spektra koja je razmotrena u prethodnom poglavlju. Ipak, na ovom mestu treba napomenuti da u praksi, primenjeni radio sistemi, ali i propagacione karakteristike, ne prate striktno definisanu nomenklaturu. To praktično znači da granice definisanih frekventijskih opsega ni u kom slučaju nisu precizno definisane sa stanovišta primene.

#### ELF, ULF (ispod 3 kHz) i VLF (3 - 30 kHz)

- Tipični servisi: Prekomorska telegrafija za brodove i luke, prekomorske veze, podzemne komunikacije.
- Karakteristike sistema: Čak i najveće antene imaju dimenzije koje su male u odnosu na talasnu dužinu. Izuzetno je teško realizovati usmereni antenski sistem. Širina radnog kanala je ograničena tako da je moguće realizovati samo sisteme veoma malog protoka podataka. Atmosferski šum je veoma izražen. Prijemne antene su nedovoljno efikasne.
- Propagacija: Koristi se efekat „talasovoda” koga čine zemlja i jonosfera. Propagacija je relativno stabilna, ali na nju mogu uticati velike naslage leda (npr. na Grenlandu). Propagacija u smerovima istok-zapad i zapad-istok nije simetrična. Iznad morske vode, na ovim talasnim dužinama, značajan je tzv. površinski talas.
- Komentar: Za frekventijski opseg ispod 9 kHz ne postoje međunarodne regulative. Opseg ispod 9 kHz uglavnom se u ograničenoj meri koristi za vojne potrebe.

#### LF (30 - 300 kHz)

- Tipični servisi: Komunikacija na velikim rastojanjima (npr. za povezivanje kontinentalnog centra sa brodovima), fiksni servisi za interkontinentalna rastojanja, difuzni servisi, vremenske reference, itd.
- Karakteristike sistema: Najčešće se koristi vertikalna polarizacija (zbog propagacije vodene tlom i zbog efikasnosti antene). Moguća je realizacija antena velike efikasnosti po cenu velikih dimenzija. Usmerene antene su veoma velike. Izražen je visok atmosferski šum i ograničen je propusni opseg.
- Propagacija: Dometi su do nekoliko hiljada kilometara. Izraženi su tzv. površinski talas i jak jonosferski talas tokom noći, ali i spori fading.

**MF (300 kHz – 3 MHz)**

- Tipični servisi: Difuzija (AM radio difuzija), radio navigacija, pomorske mobilne komunikacije.
- Karakteristike sistema: Visina vertikalne antene dimenzija  $\frac{1}{4}$  talasne dužine na 1 MHz iznosi 75 m. Moguće je realizovati usmerene antene. Prijemne antene uglavnom se realizuju za prijem magnetnog polja.
- Propagacija: Površinski talas je izražen pri prostiranju radio talasa preko morskih površina. Prisutno je intenzivno slabljenje jonosferskog talasa tokom sunčanog dela dana, ali malo slabljenje tokom noći. Postoji visok nivo atmosferskog šuma.

**HF (3 - 30 MHz)**

- Tipični servisi: Međunarodna difuzija (radio difuzija), nacionalna difuzija u tropskim regionima, komunikacije tačka-tačka na velikim rastojanjima, pomorske i vazdušne mobilne komunikacije.
- Karakteristike sistema: Antene u formi sistema horizontalnih dipola, log-periodične antene (vertikalne ili horizontalne), vertikalne štap antene. Frekvencijska agilnost je od esencijalnog značaja. U slučaju velikog zauzeća spektra mora se striktno voditi računa o intermodulaciji. Eksterni šum varira sa vremenom i lokacijom. Širine opsega su približno do 6 kHz.
- Propagacija: Propagacioni uslovi omogućavaju veze na velikim rastojanjima (čak i globalno), pri čemu se koristi jonosferski talas koji je veoma nestabilan u vremenu. Frekvencijski opseg u kome su ove veze moguće varira u intervalu od nekoliko MHz do približno 20 MHz.
- Komentar: Neophodna je promena radne frekvencije nekoliko puta tokom 24 časa. U difuznim servisima koriste se sezonski rasporedi radio kanala (frekvencija). Fiksni i neki mobilni servisi koriste inteligentne adaptivne sisteme u frekvencijskom smislu. U ovom opsegu najvećim delom realizuje se interkontinentalna kontrola vazdušnog saobraćaja. Propusni opseg sistema najčešće prevazilazi korelacioni opseg signala (minimalan potrebni opseg za prenos).

**VHF (30 - 300 MHz)**

- Tipični servisi: Kopneni mobilni radio servisi za civilne i vojne namene, pomorski i vazdušni mobilni servisi, radio difuzija zvuka (FM i DAB) i televizijskog signala (osim u UK) do rastojanja od približno 100 km, vazdušni radio navigacioni sistemi i sistemi za sletanje, analogna bežična telefonija, pejdžing, u dosta ograničenom obimu mali LEO (*Low Earth Orbit*) satelitski sistemi, itd.
- Karakteristike sistema: Antene u formi sistema dipola (*yagi*), štap antene pogodne za montažu na vozilima. Atmosferski šum je mali, dok je industrijski značajan. Pojedini sistemi koriste aktivnost meteora za realizaciju veze.

**Propagacija:** Često se koriste efekti refrakcije u troposferi (međutim, ovi efekti mogu dovesti i do veće nestabilnosti polja na prijemu). Može doći do višestrukih refleksija na trasi. Veće prepreke (brda i planine) mogu dovesti do efekata zaklanjanja, ali je često slabljenje usled difrakcije relativno malo. Neželjeni uticaji usled jonosferske nestabilnosti i meteora na vezama tipa zemlja-svemir.

### UHF (300 MHz – 3 GHz)

**Tipični servisi:** Difuzija televizijskog signala, ćelijski i personalni komunikacioni sistemi, satelitski mobilni sistemi, GPS (*Global Positioning System*), važni radio astronomski servisi, osmatrački radari, kopneni servisi tipa tačka-tačka, sistemi fiksnog radio pristupa, telemetrija, bežična kućna telefonija (*cordless*), troposferske veze.

**Karakteristike sistema:** Relativno male štap antene, antene u formi sistema dipola (*yagi*), parabolične antene za više učestanosti. Za realizaciju radio servisa u ovom opsegu, na raspolaganju su relativno široki propusni opsezi.

**Propagacija:** Dometi su tipično do linije optičke vidljivosti i nešto preko toga. Troposfersko rasejanje se koristi za transhorizontalne putanje. Efekti zaklanjanja dolaze do izražaja (brda, zgrade, drveće). Izaženi su efekti refrakcije. Na satelitske veze utiče jonosferska nestabilnost. Javljuju se efekti neželjenog vođenja talasa, itd.

### SHF (3 - 30 GHz)

**Tipični servisi:** Fiksni servisi (kopnene veze tipa tačka-tačka), fiksni satelitski servisi, radarski servisi, satelitska televizija, GSO (*GeoStacionary Orbit*) i NGSO (*Near GeoStacionary Orbit*) fiksni satelitski servisi, satelitski istraživački servisi (*remote sensing*), fiksni radio pristup.

**Karakteristike sistema:** Parabolične antene i tzv. *horn* antene velikog dobitka, talasovodi. Radio sisteme karakterišu široki propusni opsezi i veliki protoci. Moguće je korišćenje jedne frekvencije (radio kanala) za više različitih servisa.

**Propagacija:** Prepreke najčešće dovode do prekida veze. Refrakcija i neželjeno vođenje talasa (*ducting*). Slabljenje usled hidrometeora (kiša, sneg magla, itd.) značajno je na učestanostima preko 10 GHz, dok je atmosfersko slabljenje izraženo preko 15 GHz. Jonosferski uticaji su mali.

### EHF (30 - 300 GHz)

**Tipični servisi:** Buduće satelitske primene, daljinska snimanja sa satelita (*remote sensing*), širokopojasni kanal u okviru fiksnih bežičnih pristupnih mreža, budući fiksni servisi na stratosferskim platformama.



Karakteristike sistema: Male visokousmerene antene. Na raspaloganju su izuzetno široki radio kanali. Veze mogu da se ostvaruju samo na kratkim rastojanjima. Cena opreme raste sa radnom frekvencijom. Trenutno se opseg preko 60 GHz retko koristi.

Propagacija: Zahteva se direktna optička vidljivost. Problemi koji praktično dovode do prekida veza su: zaklanjanje, atmosferska apsorpcija, kiša, i magla.

## 2.2. OSNOVNI PARAMETRI ANTENSKIH SISTEMA

Antene su fizički elementi koji konvertuju električni signal (na radio učestanosti) u elektromagnetni talas na strani predajnika, i obrnuto elektromagnetni talas u električni signal na strani prijemnika. Svaki radio komunikacioni sistem zahteva neku vrstu antene na strani predajnika i na strani prijemnika. Koja forma antenskog sistema će biti korišćena zavisi od specifičnosti radio sistema koji se realizuje.

Predajna i prijemna antena se mogu posmatrati na istovetan način (princip reciprociteta, o čemu će više reči biti nešto kasnije) i zbog toga parametri koji se definišu za jednu antenu imaju iste vrednosti i u slučaju predaje i u slučaju prijema signala. Neki od parametara jedino imaju smisla, samo na strani predaje ili samo na strani prijema. Princip recipročnosti se jedino ne odnosi na aktivne antene. Ipak, ono što pravi jasnu razliku između predajnih i prijemnih antena jeste maksimalna snaga koju antena može da podrži, a to je parametar koji se odnosi samo na emitovanje signala. Međutim, sa stanovišta osnovnih principa rada, ovaj parametar je irelevantan.

### 2.2.1. DIJAGRAM ZRAČENJA ANTENE

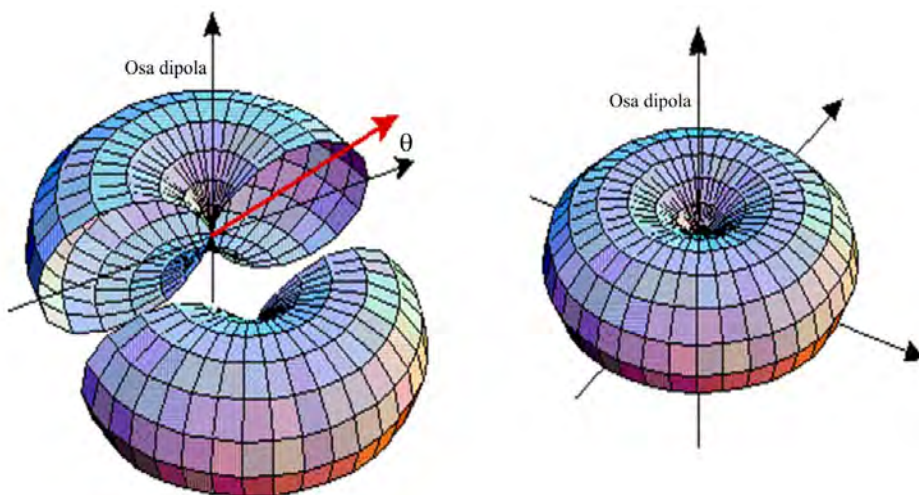
Najjednostavnija antena je izotropni radijator, koji, nažalost, ne postoji u praksi, ali se često koristi kao odličan teorijski model. Po definiciji, pod izotropnim radijatorom se podrazumeva beskonačno mala tačka u prostoru iz koje se elektromagnetni talasi šire uniformno u svi pravcima.

Za razliku od izotropnog radijatora, u slučaju realne antene, površinska gustina emitovane snage zavisi od prostornog ugla. Trodimenzionalna karakteristika emisije elektromagnetnih talasa sa antene predstavlja se tzv. dijagramom zračenja antene. Preciznije, dijagram zračenja antene predstavlja normalizovanu površinsku gustinu snage elektromagnetnog talasa u zavisnosti od prostornog ugla. Normalizacija vrednosti površinske gustine snage sprovodi se u odnosu na maksimalnu vrednost površinske gustine snage. Na ovom mestu treba posebno naglasiti da se dijagram zračenja antene odnosi isključivo na tzv. „daleko polje zračenja” (o čemu će više reči biti u poglavlju 4.2.1.) i pri tome, dijagram zračenja ne zavisi od rastojanja. Na osnovu prethodno navedenog, jasno je da je dijagram zračenja izotropnog radijatora idealna sfera. Primera radi, na slici 2.1 dat je prikaz trodimenzionalnog dijagrama zračenja polutalasnog dipola kod koga se uočavaju takozvane „nule” (izrazito slaba emisija signala) u pravcu ose antene.

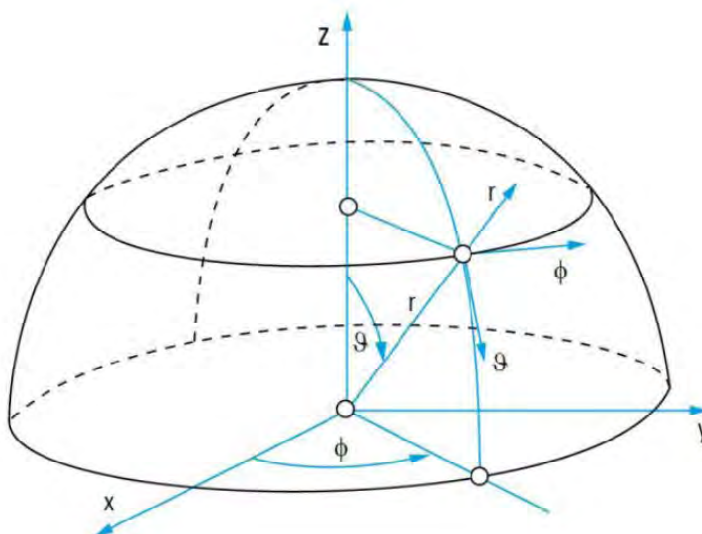
Iako je dijagram zračenja antene u realnosti trodimenzionalni, u praksi se on po pravilu prikazuje korišćenjem dva ortogonalna, planarna (dvodomenzionalna), dijagrama zračenja. Planarni dijagrami zračenja se dobijaju na taj način što se prostorni dijagram zračenja preseče sa dve ortogonalne ravni koje prolaze kroz centar izvora zračenja i pravac maksimalne emisije.

Polazeći od sferičnog koordinatnog sistema prikazanog na slici 2.2, ortogonalni dijagrami zračenja definišu se na sledeći način:

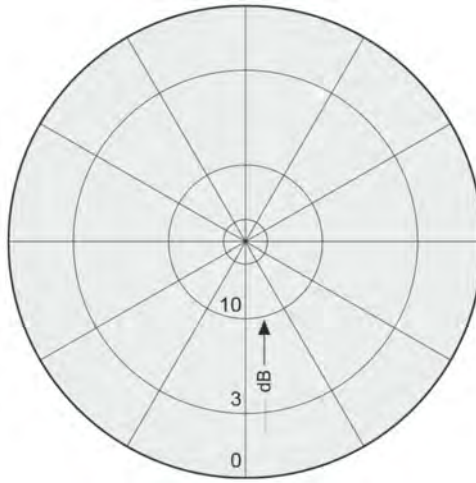
- **HORIZONTALNI DIJAGRAMI ZRAČENJA** polutalasnog dipola - slika 2.3) prikazuje zavisnost površinske gustine snage signala od ugla  $\phi$ , pri čemu je ugao  $\vartheta$  fiksiran (obično je  $\vartheta = 90^\circ$ ),
- **VERTIKALNI DIJAGRAMI ZRAČENJA** polutalasnog dipola - slika 2.4) prikazuje zavisnost površinske gustine snage signala od ugla  $\vartheta$ , pri čemu je ugao  $\phi$  fiksiran (obično je  $\phi = \pm 90^\circ$  ili  $0^\circ/180^\circ$ ).



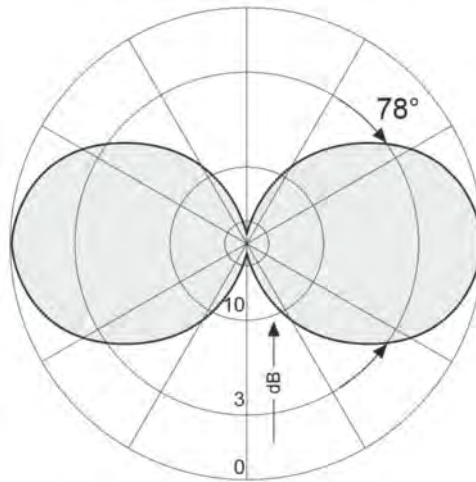
SLIKA 2.1. Trodimenzionalni dijagram zračenja polutalasnog dipola



SLIKA 2.2. Sferični koordinatni sistem



**SLIKA 2.3.** Horizontalni dijagram zračenja polutalasnog dipola



**SLIKA 2.4.** Vertikalni dijagram zračenja polutalasnog dipola

Prikaz karakteristike zračenja antene sa dva ortogonalna dijagrama zračenja je adekvatan za antene kod kojih je trodimenzionalni dijagram zračenja jasno definisan, odnosno gde se ne gubi mnogo na tačnosti zbog prikaza u dve ortogonalne ravni.

U literaturi i katalogima proizvođača često se koriste i termini „azimutalni dijagram zračenja” (eng. *azimuth pattern*) i „elevacioni dijagram zračenja” (eng. *elevation pattern*). Pri tome, prvi termin odnosi se na horizontalni dijagram zračenja, dok se drugi termin koristi za vertikalni dijagram zračenja antene. Kada se prethodno navedeni termini koriste za opisivanje dijagrama zračenja antene, pretpostavlja se da je prilikom merenja (za određivanje dijagrama zračenja) antena orijentisana na način kako se standardno instalira u praksi.

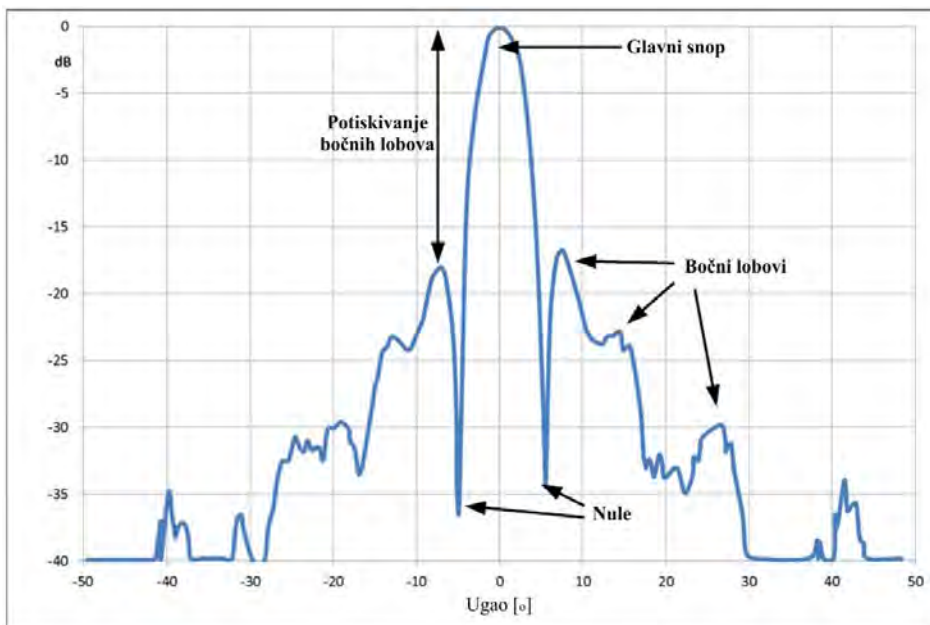
Pored prethodno navedenih termina, za linijski polarisane antene (objašnjeno u glavi 4), u praksi se često mogu naći i termini „dijagram zračenja u E-ravni” (eng. *E-plane pattern*)

i „dijagram zračenja u H-ravni” (eng. *H-plane pattern*). Pri tome, termin E-ravan odnosi se na ravan koja sadrži vektor električnog polja, dok se termin H-ravan odnosi na ravan koja sadrži vektor magnetnog polja. U ovom slučaju ortogonalne ravni dijagrama zračenja definišu se u odnosu na orijentaciju antenskih radijatora. Iz tog razloga, zavisno od montaže, jedna ista antena u jednom slučaju može generisati vertikalno polarisan talas, a u drugom horizontalni.

Dijagrami zračenja antene uobičajeno se prikazuju u polarnim koordinatama. Prednost ovakvog prikaza je u tome što se raspodela intenziteta zračenja antene po uglovima može lakše vizuelno sagledati. U pojedinim slučajevima (npr. za antene sa velikim usmerenjem) pogodno je dijagram zračenja prikazati u pravougaonom koordinatnom sistemu. Na ovaj način bolje se mogu uočiti detalji koji se tiču glavnog snopa zračenja, kao i susednih bočnih lobova (na slici 2.5 dat je primer vertikalnog dijagrama zračenja antene).

Na osnovu dijagrama zračenja antene moguće je definisati nekoliko dodatnih značajnih parametara antene (videti sliku 2.6) i to:

- **ŠIRINA GLAVNOG SNOPA ZRAČENJA ANTENE** (eng. *half-power beamwidth*) definisana je uglom između dve tačke na glavnom snopu zračenja antene koje su po vrednosti za 3 dB manje od nivoa maksimalne emisije. Širina glavnog snopa zračenja definiše se za obe ortogonalne ravni zračenja antene.
- **ODNOS NAPRED-NAZAD** (eng. *front-to-back ratio*) definisan je nivoom zračenja u smeru suprotnom od smera maksimalnog zračenja (pod uglom od  $180^\circ$ ) i to relativno u odnosu na nivo maksimalnog zračenja. Po pravilu, izražava se u dB jedinicama. Odnos napred-nazad definiše se samo za usmerene antene.
- **POTISKIVANJE BOČNIH LOBOVA** (eng. *side lobe suppression*) predstavlja odnos između nivoa maksimalnog zračenja u pravcu glavnog snopa i nivoa najvećeg bočnog loba.



SLIKA 2.5. Vertikalni dijagram zračenja antene prikazan u pravougaonom koordinatnom sistemu