

# **USMERENE RADIO VEZE**

**Nataša Nešković**

Dr Nataša Nešković

## **USMERENE RADIO VEZE**

prvo izdanje

### *Recenzenti*

Prof. dr Nenad Simić

Prof. dr Irini Reljin

Prof. dr Đorđe Paunović

### *Izdavač*

AKADEMSKA MISAO

Beograd

Naučno-nastavno veće Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je, na osnovu člana 41 statuta i člana 14 Pravilnika o udžbenicima i drugoj nastavnoj literaturi, na svojoj sednici održanoj 11.10.2011. godine donelo ODLUKU o prihvatanju ovog udžbenika kao nastavni materijal na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

### *Dizajn korice*

Zorica Marković, akademski slikar

### *Štampa*

Planeta print, Beograd

### *Tiraž*

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-412-4

---

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

---

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. FREKVENCIJSKO PLANIRANJE.....</b>	<b>3</b>
2.1. MEĐUNARODNI FREKVENCIJSKI PLANOVI .....	4
2.1.1. Alternativni raspored kanala.....	4
2.1.2. Istokanalni raspored.....	7
2.1.3. Umetnuti raspored .....	7
2.2. SUSEDNOKANALNO RAZDVAJANJE .....	8
2.2.1. Zajednička trasa .....	8
2.2.2. Razdvojene trase.....	9
2.3. DODELJIVANJE RADIO KANALA.....	9
2.4. ANALIZA TIPIČNIH MREŽA.....	10
2.4.1. Opšta razmatranja .....	10
2.4.2. Okosnica mreže .....	11
2.4.3. Višestruko korišćenje istih radio kanala.....	11
2.4.4. Detaljno planiranje.....	12
2.4.5. Mreža u formi prstena.....	12
<b>3. ANALIZA TRASE .....</b>	<b>15</b>
3.1. PRIPREMNE AKTIVNOSTI ZA PROJEKTOVANJE RADIO-RELEJNOG SISTEMA.....	15
3.1.1. Određivanje tačnih pozicija i nadmorskih visina lokacija od interesa .....	16
3.1.2. Provera direktne optičke vidljivosti.....	16
3.1.3. Klasifikacija terena i propagacioni uslovi .....	16
3.1.4. Provera mogućih ometača (interferencija).....	16
3.1.5. Provera zemljišta ili postojećih stubova .....	17
3.1.6. Infrastrukturne karakteristike od interesa .....	17
3.2. PROFIL TERENA.....	17
3.2.1. Linija optičke vidljivosti i načini potvrde optičke vidljivosti.....	18
3.2.2. Frenelove zone.....	19
3.3. REFRAKCIJA.....	21
3.3.1. Indeks prelamanja atmosfere .....	22
3.3.2. Indeks prelamanja kao funkcija visine .....	23
3.3.3. Tipovi atmosfera u zavisnosti od vrednosti faktora refrakcije $k$ .....	25
3.3.4. Vrednost faktora refrakcije $k$ koja se koristi u analizi trasa radio-relejnih veza.....	27
3.3.5. Korekcija profila terena usled zakrivljenosti Zemlje.....	28
3.3.6. Primeri analize profila trase.....	29

3.4. REFLEKSIJA .....	33
3.4.1. Zakoni odbijanja i prelamanja .....	33
3.4.2. Uticaj refleksije o tlo na performanse usmerene radio veze.....	34
3.4.3. Određivanje lokacije tačke refleksije na realnom terenu između primopredajnih stanica.....	37
3.4.3.1. Geometrijski metod korišćenjem osobina elipse .....	37
3.4.3.2. Geometrijski metod korišćenjem zakona odbijanja pri aproksimaciji terena parabolom ili pravolinijskim segmentima.....	38
3.4.3.3. Analitički metod prema preporuci ITU-R P.530 .....	40
3.4.4. Veličina oblasti refleksije .....	41
3.4.5. Rejljev kriterijum glatкости .....	42
3.5. TEHNIKE ZA UMANJENJE UTICAJA REFLEKSIJE O TLO NA PERFORMANSE RADIO-RELEJNE VEZE .....	44
3.5.1. Tehnike koje ne koriste diversiti.....	44
3.5.2. Uslov sigurne upotrebe prostornog diversitija prema preporuci ITU-R P.530 .....	46
3.5.3. Određivanje optimalnog rastojanja između antena kada se koristi tehnika prostornog diversitija.....	47
3.5.3.1. Geometrijski metod korišćenjem osobine elipse .....	47
3.5.3.2. Analitički metod.....	48
3.6. DIFRAKCIJA.....	49
<b>4. ANTENE .....</b>	<b>51</b>
4.1. PARAMETRI KOJI KARAKTERIŠU ANTENE.....	51
4.1.1. Dijagram zračenja .....	51
4.1.2. Polarizacija antene .....	54
4.1.3. Dobitak antene.....	57
4.1.4. Efektivna površina i dužina antene.....	58
4.1.5. Impedansa antene.....	58
4.1.6. Stepen stojećih talasa .....	59
4.1.7. Radni opseg antene.....	59
4.2. OSNOVNI ELEMENTI ANTENA .....	59
4.3. ANTENE SA PARABOLOIDNIM REFLEKTOROM.....	60
4.3.1. Realizacija primarnog radijatora .....	63
4.4. PREGLED OSNOVNIH PARAMETARA ANTENA PO KATEGORIJAMA.....	65
4.5. SLOŽENI ANTENSKI SISTEMI .....	67
4.5.1. <i>Horn</i> -paraboloidne antene .....	67
4.5.2. <i>Cassegrain</i> antene.....	68
4.5.3. <i>Horn-Cassegrain</i> antene .....	68
4.6. RAD U RAZLIČITIM KLIMATSKIM USLOVIMA.....	69
<b>5. PASIVNE RELEJNE STANICE .....</b>	<b>71</b>
5.1. SLABLJENJE NA TRASI NA KOJOJ JE POSTAVLJEN RAVNI REFLEKTOR.....	72
5.2. SPECIJALNE KONFIGURACIJE RAVNIH REFLEKTORA .....	77
5.3. PRORAČUN AZIMUTA I ELEVACIJE RAVNOG REFLEKTORA .....	79
5.4. PASIVNA RELEJNA STANICA REALIZOVANA SA DVE PARABOLOIDNE ANTENE LEĐA U LEĐA .....	81

<b>6. METODOLOGIJA PRORAČUNA KVALITETA I RASPOLOŽIVOSTI RADIO-RELEJNIH VEZA .....</b>	<b>83</b>
6.1. SNAGA SIGNALA NA PRIJEMU PRI STABILNOM PROSTIRANJU .....	83
6.2. ODREĐIVANJE SLABLJENJA NA TRASI PRI STABILNOM PROSTIRANJU .....	83
6.3. REZERVA ZA FEDING .....	85
6.4. FEDING .....	85
6.4.1 Propagacijski feding .....	86
6.4.2. Interferencijski feding .....	87
6.4.2.1. Ravni feding .....	87
6.4.2.2. Selektivni feding .....	90
6.4.3. Apsorpcijski feding .....	100
6.4.3.1. Apsorpcija u gasovima .....	100
6.4.3.2. Apsorpcija u hidrometeorima .....	111
6.4.3.3. Pluviometrijska klima .....	116
6.4.3.4. Proračun neraspoloživosti zbog slabljenja unetog pojavom kiše .....	117
<b>7. DIVERSITI TEHNIKE .....</b>	<b>119</b>
7.1. PROSTORNI DIVERSITI .....	121
7.2. FREKVENCIJSKI DIVERSITI .....	124
7.3. KOMBINOVANI DIVERSITI .....	126
7.4. HIBRIDNI DIVERSITI .....	127
7.5. UGAONI DIVERSITI .....	127
7.6. <i>PATH</i> DIVERSITI .....	129
<b>8. PRENOS NA JEDNOM RADIO KANALU SA DVE ORTOGONALNE POLARIZACIJE .....</b>	<b>131</b>
8.1. ANALIZA KROSPOLARIZACIONE INTERFERENCIJE U USLOVIMA ČISTE ATMOSFERE .....	132
8.2. ANALIZA KROSPOLARIZACIONE INTERFERENCIJE U USLOVIMA ATMOSFERSKIH PADAVIDNA .....	135
<b>9. RASPOLOŽIVOST OPREME .....</b>	<b>139</b>
9.1. UČESTALOST OTKAZA OPREME .....	139
9.2. <i>MTBF</i> MODULA .....	140
9.3. PRORAČUN (NE)RASPOLOŽIVOSTI .....	140
9.3.1. Neraspoloživost jednog modula .....	140
9.3.2. Neraspoloživost kaskadno vezanih modula .....	141
9.3.3. Neraspoloživost paralelno vezanih modula .....	141
9.3.4. Neraspoloživost $n+1$ redundantnog sistema .....	142
9.4. PRIMERI PRORAČUNA RASPOLOŽIVOSTI .....	142
9.4.1. Primer 1. ....	142
9.4.1.1. Nezaštićeni sistem .....	143
9.4.1.2. Zaštićeni sistem - $1+1$ HSB .....	144
9.4.1.3. Frekvencijski diversiti - $n+1$ FD .....	145

9.4.2. Primer 2 .....	146
9.4.2.1. Nezaštićeni sistem .....	147
9.4.2.2. Zaštićeni sistem - 1+1 HSB.....	148
<b>10. ZAHTEVI ZA KVALITET I RASPOLOŽIVOST .....</b>	<b>149</b>
10.1. KVALITET PRENOSA SIGNALA .....	149
10.1.1. Definisanje parametara za procenu kvaliteta prenosa signala .....	150
10.1.2. Parametri kvaliteta na međunarodnim segmentima.....	152
10.1.2.1. Primeri proračuna parametara kvaliteta na međunarodnim segmentima.....	154
10.1.3. Parametri kvaliteta na nacionalnim segmentima .....	155
10.1.3.1. Primeri proračuna parametara kvaliteta na nacionalnim segmentima.....	157
10.2. RASPOLOŽIVOST RADIO-RELEJNE VEZE .....	158
10.2.1. Definisanje parametara za procenu raspoloživosti .....	159
10.2.2. Zahtevi za raspoloživost na trasama međunarodnog značaja .....	159
10.2.2.1. Primeri proračuna kriterijuma raspoloživosti za veze međunarodnog značaja .....	160
10.2.3. Zahtevi za raspoloživost na nacionalnim segmentima .....	161
10.2.3.1. Primeri proračuna kriterijuma raspoloživosti na nacionalnim segmentima.....	162
<b>11. PROJEKTOVANJE RADIO-RELEJNIH VEZA .....</b>	<b>165</b>
11.1. RADIO-RELEJNI UREDAJI .....	165
11.1.1. Tip 1 .....	165
11.1.2. Tip 2.....	168
11.1.3. Tip 3 .....	173
11.2. PRIMERI PROJEKTOVANJA .....	175
11.2.1. Radio-relejna veza na trasi RS1-RS2 u frekvencijskom opsegu 8GHz	175
11.2.1.1. Kapacitet radio-relejne veze 16x2 Mb/s.....	176
11.2.1.2. Kapacitet radio-relejne veze 155.52 Mb/s.....	181
11.2.2. Radio-relejna veza na trasi RS3-RS4 u frekvencijskom opsegu 6GHz.	187
11.2.3. Radio-relejna veza na trasi RS5-RS6 u frekvencijskom opsegu 15GHz	196
<b>12. INTERFERENCIJA .....</b>	<b>203</b>
12.1. ŠUM .....	203
12.2. UTICAJ INTERFERIRAJUĆIH SIGNALA NA NIVO PRAGA PRIJEMA.	205
12.2.1. Istokanalna interferencija.....	206
12.2.2. Susednokanalna interferencija.....	208
12.3. PRORAČUN NIVOVA INTERFERIRAJUĆEG SIGNALA .....	208
12.4. PROPAGACIJA INTERFERIRAJUĆIH SIGNALA .....	210
<b>13. PRORAČUN INTERFERENCIJE U RADIO-RELEJNOJ MREŽI .....</b>	<b>213</b>
13.1. UZROCI INTERFERENCIJE .....	213

13.2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE INTERFERENCIJE U DIGITALNIM RADIO-RELEJNIM MREŽAMA .....	213
13.3. PRORAČUN NIVOVA INTERFERIRAJUĆEG SIGNALA .....	216
13.4. ANALIZA INTERFERENCIJE U RADIO-RELEJNOJ MREŽI .....	218
13.4.1. Primer 1 .....	218
13.4.2. Primer 2 .....	230

<b>LITERATURA .....</b>	<b>243</b>
-------------------------	------------

<b>PRILOG - SLIKE U BOJI .....</b>	<b>245</b>
------------------------------------	------------





## 1. UVOD

Planiranje usmerenih radio veza podrazumeva određivanje i definisanje konfiguracije mreže, kapaciteta sistema, kriterijuma kvaliteta i raspoloživosti i radio-frekvencijskih opsega. Takođe, treba imati u vidu i izbor lokacija, opreme, stubova i objekata. Kroz ovu knjigu detaljnije će biti obrađivani individualni parametri radio-relejnog sistema kao što su: tip, veličina i visina montaže antena, proračun kvaliteta i raspoloživosti, diversiti konfiguracije i frekvencijsko planiranje. Od izuzetne važnosti je i proragacija radio talasa kroz atmosferu i njen uticaj na performanse digitalnih radio-relejnih sistema. Principi, modeli za proračun i merenja ukazuju na očiglednu, izvesnu, nepredvidivost proropagacije radio talasa kroz atmosferu. Osnovna svrha planiranja radio-relejnog sistema jeste da se dobije pouzdan sistem prenosa koji mora da zadovolji unapred postavljene zahteve za kvalitet i raspoloživost. Zahtevi za kvalitet i raspoloživost definisani su preporukama za različite tipove i kapacitete veza. Preporuke su definisane od strane Internacionalne unije za telekomunikacije (*International Telecommunications Union* - ITU), odnosno Sektora za telekomunikacije (*Telecommunication Standardization Sector* - ITU-T) i Sektora za radiokomunikacije (*Radiocommunication Sector* - ITU-R). Za projektanta je važno da dobro poznaje metode predikcije nivoa signala na mestu prijema, kao i zahteve za kvalitet i raspoloživost. Prilikom projektovanja radio-relejne veze neophodno je izračunati kvalitet i raspoloživost, odnosno neraspoloživost, veze usled efekata propagacije, padavina, problema interferencije i otkaza uređaja.

Veoma važan aspekt projektovanja je i taj što je broj raspoloživih radio kanala ograničen, tako da je frekvencijsko planiranje važan deo sistemskog planiranja radio-relejnog sistema. Zadatak projektanta je da izabere frekvencijski opseg (često nije u nadležnosti projektanta nego nadležne nacionalne administracije) i vrstu opreme i to na najekonomičniji način. Takođe, treba imati u vidu i buduća proširenja sistema.

Raspoloživost radio-relejnog sistema je funkcija propagacionih efekata i pouzdanosti uređaja. Raspoloživost radio-relejne opreme iskazuje se preko parametra *Mean Time Between Failures* (MTBF) koji predstavlja prosečno vreme između dva otkaza za module uređaja. Praksa pokazuje da raspoloživost sistema češće zavisi od drugih parametara: problemi sa održavanjem i otkazi usled problema u napajanju. I to, naravno, mnogo češće u ruralnim područjima.

Generalno, jedan radio-relejni sistem čini više pojedinačnih radio-relejnih veza. Pri tome, radio-relejna veza predstavlja način prenosa signala između dve tačke koji se obavlja posredstvom elektromagnetnih talasa. Za konverzije elektromagnetnog talasa u električni signal i obrnuto koriste se primopredajne antene.

Usmerene radio veze podrazumevaju da je terminalna oprema na fiksnim lokacijama ili može biti transportabilna, ali je u toku rada na fiksnoj lokaciji. Usmerene radio veze služe prvenstveno za profesionalne veze. Podrazumeva se da se emitovanje signala vrši usmerenim antenama. Realizuju se u frekvencijskim opsezima od 300 MHz do 100 i više GHz (do 1GHz realizovale su se veze malog kapaciteta u sistemima starije generacije).

Imajući u vidu način funkcionisanja usmerenih radio-veza razlikuju se tri osnovne kategorije:

- 1) veze koje se prostiru na površini zemlje i funkcionišu u uslovima direktne optičke vidljivosti;
- 2) veze koje koriste efekte troposferskog rasejanja: jak signal se uputi u više slojeve atmosfere i javlja se efekat rasejanja koji predstavlja sekundarni izvor zračenja, pri čemu mali deo stiže na mesto cilja;
- 3) veze posredstvom veštačkih satelita koji imaju funkciju relejne stanice.

U okviru ove knjige razmatra se samo prva kategorija, tj. usmerene radio veze koje se prostiru na površini zemlje.

Rad na visokim frekvencijama pruža i neke pogodnosti. Iznad 1 GHz uticaj atmosferskih i industrijskih smetnji je praktično zanemarljiv, pa je moguće obezbediti konstantno visok kvalitet signala na mestu prijema. Zahvaljujući malim talasnim dužinama moguće je napraviti antene sa visokim stepenom usmerenosti, što omogućava da predajnici budu male snage. Takođe, na relativno malom prostoru mogu da se realizuju veze na istim frekvencijama (efikasno prostorno ponavljanje frekvencijskih resursa).

Naravno, svaka dobra stvar ima i neke loše strane, tako da i usmerene radio veze imaju svoje nedostatke:

- 1) Prvi problem predstavlja nestabilnost polja na mestu prijema (feding). Drastičan slučaj je svakako da se signal na mestu prijema potpuno izgubi. Usmerene radio veze su podložne tome, ali postoje mere kojima se uticaj fedinga smanjuje.
- 2) Po pravilu, zahteva se da postoji direktna optička vidljivost između antena terminalnih stanica jedne usmerene radio veze. Između lokacija koje nemaju optičku vidljivost dodaju se relejne stanice (aktivne ili pasivne).

Interesantno je analizirati mesto radio-relejnih sistema u telekomunikacionom okruženju. Radio-relejni sistemi u poređenju sa tzv. linijskim prenosom, tj. prenosom po fizičkim vodovima imaju svojih prednosti i mana. Prednost radio-relejnih sistema je svakako u brzini instalacije, manjim problemima koje nosi izgradnja (dozvole, vlasnički odnosi i sl.), u situacijama gde nema drugog racionalnog rešenja (npr., prelazak preko reke i sl.) i to naročito na većim rastojanjima. Ranije su korišćeni kablovi sa bakarnim provodnicima. S druge strane, koaksijalni kablovi su mogli da obezbede isti saobraćajni kapacitet kao radio-relejni sistemi, ali su bili skupi.

U poslednje vreme aktuelni su optički sistemi koji se karakterišu veoma velikim saobraćajnim kapacitetima, pri čemu je slabljenje optičkih kablova jako malo (ostvaruju se veze i do 300 km bez regeneracije). Iz tog razloga, na magistralnim pravcima osnovni transmisioni medijum je, najčešće, optički sistem. Radio-relejni sistemi se povlače na pristupne veze, pri čemu će i dalje biti superiorni u uslovima težih terena i kada je neophodno brzo uspostavljanje veze. Danas u svakoj zemlji postoje mreže radio-relejnih sistema kao infrastrukturna podrška difuznim, mobilnim i drugim telekomunikacionim sistemima.