

OSNOVE TELEKOMUNIKACIJA

Branislav M. Todorović

AKADEMSKA MISAO
Beograd, 2021.

Prof. dr Branislav M. Todorović

OSNOVE TELEKOMUNIKACIJA

Recenzenti:

Dr Aleksa Zejak, naučni savetnik
Istraživačko razvojni institut RT-RK, Novi Sad

Dr Milenko S. Andrić, redovni profesor
Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu

Izdavač:
Akademska misao, Beograd

Štampa:
Akademska misao, Beograd

Tiraž
100 primeraka

ISBN 978-86-7466-864-1

PREDGOVOR

Materijal prikazan u ovoj knjizi je nastao u toku pripreme predavanja iz predmeta Telekomunikacije II i Statistička teorija telekomunikacija, koje dugi niz godina držim studentima Vojne akademije Univerziteta odbrane u Beogradu, kao i predmeta Osnove telekomunikacija I i Osnove telekomunikacija II, koje sam držao studentima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banja Luci u toku pet školskih godina, od 2010/2011. do 2014/2015.

Ova knjiga je prvenstveno namenjena studentima osnovnih studija elektrotehničkih fakulteta. Verujem da će biti korisna i studentima posle diplomskih studija u oblasti telekomunikacija, kao i inženjerima u ovoj oblasti.

Materijal je podeljen u 15 glava. Na kraju pojedinih glava, gde je to bilo potrebno, prikazani su rešeni primeri.

Što se tiče korišćene literature, ona prvenstveno obuhvata knjige sa sličnom tematikom. Pored toga, materijal u ovoj knjizi je dopunjen sadržajima iz pojedinih stručnih i naučnih časopisa, kao i iz dostupnih materijala za predavanja na drugim univerzitetima.

Želim da se zahvalim Nebojši Maletiću, dipl.inž. elektrotehnike – master, koji je uradio sve ilustracije u ovoj knjizi.

Na kraju, želim da se posebno zahvalim recenzentima, koji su odvojili svoje slobodno vreme da bi detaljno pročitali ovaj materijal i dali dragocene sugestije.

Autor

S A D R Ź A J

1. UVOD.....	1
1.1. Kratka istorija električnih telekomunikacija	3
2. MODEL TELEKOMUNIKACIONOG SISTEMA.....	5
3. SIGNALI I NJIHOVE KARAKTERISTIKE	9
3.1. Statističke osobine signala	11
3.2. Analiza determinističkih signala	11
3.2.1. Korelacija	12
3.2.2. Konvolucija	14
3.2.3. Furijeova transformacija	15
3.2.4. Veza korelacije i Furijeove transformacije periodičnih signala.....	21
3.2.5. Veza korelacije i Furijeove transformacije neperiodičnih signala.....	23
3.2.6. Veza konvolucije i Furijeove transformacije periodičnih signala	26
3.2.7. Veza konvolucije i Furijeove transformacije neperiodičnih signala...	27
3.3. Analiza slučajnih signala	28
3.3.1. Opisivanje slučajnih signala u vremenskom domenu	28
3.3.2. Statističke karakteristike slučajnih signala	31
3.3.3. Funkcije gustine verovatnoće	33
3.3.4. Centralna granična teorema	35
3.3.5. Stacionarnost i ergodičnost	36
3.3.6. Opisivanje slučajnih signala u frekvencijskom domenu	37
3.4. Jedinice koje se koriste u telekomunikacijama	41
3.5. Kriterijumi za ocenu kvaliteta prenosa signala	43
3.6. Primeri	44
4. ANALOGNI I DISKRETNi SIGNALI.....	53
4.1. Analogni signali	53
4.1.1. Govorni signal	53
4.1.2. Muzički signal	58
4.1.3. Televizijski signal	59
4.2. Diskretni signali	64
4.2.1. Binarni signali i njihovi signalizacioni formati	65
4.2.2. <i>M</i> -arni signali	68
4.2.3. Digitalni radio i televizijski signali	69
5. DISKRETIZOVANJE ANALOGNIH SIGNALA	71
5.1. Diskretizovanje signala po vremenu	71
5.1.1. Teorema o uzorkovanju	73
5.1.2. Poduzorkovanje	78
5.2. Diskretizovanje signala po amplitudi	80
5.2.1. Uniformno kvantovanje	80

5.2.1.1. Greška usled kvantovanja	81
5.2.2. Neuniformno kvantovanje	84
5.3. Digitalizovanje signala	85
5.4. Neka praktična pitanja vezana za diskretizovanje analognih signala ...	85
5.5. Primeri	87
6. OSNOVNI POJMOVI TEORIJE INFORMACIJA	89
6.1. Diskretni izvori	90
6.1.1. Diskretni izvor bez memorije	90
6.1.2. Diskretni izvor sa memorijom	91
6.2. Analogni izvori	92
6.3. Količina informacije	92
6.4. Entropija	94
6.5. Primeri	97
7. KANAL	99
7.1. Funkcija prenosa kanala	99
7.2. Odziv kanala na impulsnu funkciju	101
7.3. Idealna funkcija prenosa kanala	101
7.4. Propusni opseg kanala	103
7.5. Šum u kanalu	104
7.6. Kapacitet kanala	107
7.7. Binarni kanal	109
7.8. Prolazak slučajnih signala kroz linearne i nelinearne kanale	111
7.9. Primeri	112
8. PRENOS SIGNALA U OSNOVNOM OPSEGU	119
8.1. Statističko kodovanje	121
8.1.1. Osnovni termini i definicije statističkog kodovanja	122
8.1.2. Srednja dužina kodne reči	124
8.1.3. Kodno stablo	124
8.1.4. Hemingovo rastojanje	125
8.1.5. Kraftova nejednakost	125
8.1.6. Šenonova teorema o statističkom kodovanju	126
8.1.7. Efikasnost i suvišnost koda	126
8.1.8. Izbor kompaktnog koda	126
8.1.8.1. Šenon-Fanoov postupak	127
8.1.8.2. Hafmenov postupak	128
8.1.9. Dinamički postupci	129
8.1.9.1. Lempel-Ziv postupak	129
8.2. Zaštitno kodovanje	130
8.2.1. Blok kodovi	131
8.2.1.1. Hemingov kod	132
8.2.2. Konvolucionni kodovi	135

8.2.3. Kodni dobitak	139
8.3. Detekcija signala	139
8.3.1. Detektor sa linearnim filtrom	140
8.3.2. Detektor sa prilagođenim filtrom	146
8.4. Izobličenja signala u prenosu	154
8.4.1. Linearna izobličenja	154
8.4.2. Nelinearna izobličenja	156
8.4.3. Uticaj širine propusnog opsega kanala	159
8.4.4. Intersimbolska interferencija	162
8.4.5. Nikvistovi kriterijumi	162
8.4.6. Dijagram oka	165
8.5. Modulacije u osnovnom opsegu – Impulsne modulacije	166
8.5.1. Impulsna amplitudska modulacija	169
8.5.2. Impulsna modulacija po trajanju	169
8.5.3. Impulsna položajna modulacija	170
8.5.4. Impulsna kodna modulacija	170
8.5.5. Hibridna modulacija	170
8.6. Primeri	171
9. ANALOGNE MODULACIJE	183
9.1. Zašto je modulacija potrebna?	186
9.2. Analogne amplitudske modulacije	187
9.2.1. Konvencionalna amplitudska modulacija	188
9.2.1.1. Bilans snage <i>KAM</i> signala.	191
9.2.2. Amplitudska modulacija sa dva bočna opsega	192
9.2.3. Amplitudska modulacija sa jednim bočnim opsegom	194
9.2.4. Amplitudska modulacija sa nesimetričnim bočnim opsezima	197
9.3. Analogni <i>AM</i> modulatori	197
9.3.1. Princip realizacije <i>AM</i> modulatora	197
9.3.2. Realizacija produktne modulacije pomoću nelinearnog sklopa	198
9.3.3. Realizacija produktne modulacije pomoću prekidačkih sklopova ...	201
9.4. Analogni <i>AM</i> demodulatori	204
9.4.1. Detektor anvelope	204
9.4.2. Produktna demodulacija	206
9.5. Analogne ugaone modulacije	208
9.5.1. Analogna fazna modulacija	209
9.5.2. Analogna frekvencijska modulacija	210
9.5.3. Veza analogne fazne i analogne frekvencijske modulacije	211
9.5.4. Širina spektra analogno ugaono modulisanih signala	214
9.5.5. Karsonov obrazac	218
9.6. Analogni <i>FM</i> modulatori	219
9.7. Analogni <i>FM</i> demodulatori	222
9.8. Optimalni filter	224
9.9. Primeri	229

10. DIGITALNE MODULACIJE	233
10.1. Digitalne amplitudske modulacije	234
10.2. Digitalne fazne modulacije	240
10.3. Digitalne frekvencijske modulacije	247
10.4. Digitalne hibridne modulacije	252
10.5. Primeri	253
11. MODULACIJE U PROŠIRENOM SPEKTRU	259
11.1. Direktna sekvenca	260
11.2. Frekvencijsko skakanje	265
11.3. Kodne sekvence	267
11.4. Primeri	271
12. SINHRONIZACIJA	273
12.1. Sinhronizacija nosioca	273
12.1.1. Sinhronizacija signala sa istaknutim nosiocem	274
12.1.2. Sinhronizacija signala sa potisnutim nosiocem	274
12.2. Bitska sinhronizacija	277
12.3. Kodna sinhronizacija	279
12.4. Sinhronizacija rama	283
12.5. Sinhronizacija mreže	283
13. PRENOSNI PUTEVI	285
13.1. Linijski prenos	286
13.1.1. Simetrični kablovi	286
13.1.2. Koaksijalni kablovi	288
13.1.3. Talasovodi	289
13.1.4. Optički kablovi	291
13.2. Bežični prenos	293
13.2.1. Pojave pri prostiranju radio talasa	295
13.2.2. Putevi prostiranja radio talasa	298
14. VRSTE PRENOSA	301
14.1. Višestruki pristup sa frekvencijskom raspodelom kanala	302
14.2. Višestruki pristup sa vremenskom raspodelom kanala	303
14.3. Višestruki pristup sa kodnom raspodelom kanala	304
14.4. Hibridne tehnike višestrukog pristupa	305
15. ZAŠTITA PORUKA U PRENOSU.....	307
15.1. Postupci šifrovanja kroz istoriju.	308
15.2. Savremeni postupci šifrovanja	310
DODATAK 1: Definicije verovatnoće	313
DODATAK 2: Gausove funkcije greške i Q funkcija	317

DODATAK 3: Identiteti iz teorije Beselovih funkcija	319
DODATAK 4: Grčki alfabet	321
LITERATURA	323
Beleška o autoru	326

1. UVOD

Komunikacija (lat. *communicare* – razmenjivati, saopštavati) je složen proces kojim se razmenjuju poruke između ljudi ili uređaja. Kada se poruke razmenjuju između ljudi, onda je to društvena komunikacija. Prema Kantu¹, misliti se ne može drugačije nego u zajednici s drugima, a upravo misliti u zajednici s drugima jeste suština društvene komunikacije. S druge strane, tehnička komunikacija je razmena poruka između uređaja. Postoji i hibridna varijanta, kada čovek komunicira sa uređajem.

Proces komunikacije ima najmanje dva učesnika: izvor poruke (engl. *source*) i korisnika poruke (engl. *user*). Svaka poruka se sastoji od skupa simbola. U društvenoj komunikaciji postoje različite vrste poruka: pisani tekst, govor, muzika, nepokretna ili pokretna slika. Ako je reč o pisanom tekstu, onda su simboli: slova, brojevi i znaci interpunkcije. Ako je reč o govoru, muzici ili slici, onda su simboli vremenske funkcije. U tehničkoj komunikaciji poruka se najčešće sastoji od povorke impulsa.

Pojam *poruka* je usko povezan sa pojmom *informacija*. Iako se ova dva pojma često koriste kao sinonimi, između njih postoji značajna razlika. Poruka je skup simbola, a informacija je poruka koja ima značenje. Drugim rečima, informacija je poruka koja korisniku saopštava nešto novo, tj. otklanja neizvesnost. Otuda, pojam informacija ima različita značenja u različitim kontekstima, a povezan je sa pojmovima kao što su: podatak, znanje, značenje, kontrola, upravljanje, kao i entropija.

Teorija komunikacija je multidisciplinarna teorija koja se bavi društvenim komunikacijama i obuhvata filologiju, filosofiju, psihologiju, elektrotehniku i druge oblasti. Ona se bavi sa tri osnovna pitanja:

- (1) Koliko sadržaj poruke verno odražava značenje koje izvor poruke treba da proizvede,
- (2) Sa kolikom tačnošću se poruka prenosi,
- (3) Da li preneti poruka postiže željeni efekat kod korisnika poruke.

¹ Immanuel Kant (*Immanuel Kant*, 1724-1804), nemački filosof.

Kada se u društvenim komunikacijama vrši prenos pisanog teksta ili govora, proučavanje sadržaja i značenja poruke je semantički problem koji spada u oblast filologije. Da li preneti poruka postiže željeni efekat kod korisnika – to je pitanje koje spada u oblast filozofije i psihologije. Dakle, u društvenim komunikacijama prvo i treće pitanje su, uglavnom, izvan okvira inženjerskog interesovanja. Dodatno, u tehničkim komunikacijama između dva uređaja, prvo i treće pitanje ne postoje.

Na osnovu prethodno izloženog, jasno je da će drugo pitanje biti predmet ove knjige, a preostala dva pitanja će biti razmatrana samo u onoj meri u kojoj su direktno povezana sa drugim pitanjem.

Nakon što je objašnjeno značenje pojma *komunikacija*, potrebno je da se razmotri pojam *telekomunikacije*. Ova reč je prvobitno nastala 1904. godine u francuskom jeziku (*télécommunication*), kao kovanica grčkog prefiksa *tele-* (τηλε-), što znači “daleko”, i latinske reči *communicare*, što znači “razmenjivati, saopštavati”. Kasnije, ova reč je prihvaćena u mnogim drugim jezicima, uključujući srpski.

Telekomunikacije su oblast ljudske delatnosti koja se bavi razmenjivanjem (prenošenjem) poruka između dva ili više učesnika na udaljenim mestima. Danas se podrazumeva da se ovaj prenos odvija putem električnih signala. Međutim, nije uvek bilo tako.

Rani oblici telekomunikacija su koristili dimne signale i bubnjeve. Dimni signali su korišćeni u Kini i Severnoj Americi, dok su bubnjevi korišćeni u Africi i Južnoj Americi. U srednjem veku, nizovi tornjeva na vrhovima brda su korišćeni kao način za prenošenje poruka. Godine 1792, francuski inženjer Klod Šape (*Claude Chappe*) je sagradio prvi fiksni sistem za vizuelne telekomunikacije, tzv. semaforu liniju, između Lila i Pariza. Ovi semafori su zahtevali obučene operatere i skupe tornjeve na rastojanjima od 10 do 30 *km*. Kao posledica upotrebe električnog telegrafa, poslednja komercijalna semaforna linija je napuštena 1880. godine.

S obzirom na to da ova knjiga razmatra električne telekomunikacije, u tekstu koji sledi dat je kratak prikaz istorije njihovog razvoja.

1.1. Kratka istorija električnih telekomunikacija

Još u antičko doba ljudi su znali za postojanje elektriciteta, a sam naziv je izveden od reči elektron (grč. *ηλεκτρον* - ćilibar). Naime, Tales iz Mileta (624-547 p.n.e) je primetio da šipka ćilibara, kada se protrlja mačjim krznom, ima osobinu da privlači lake predmete poput perja i papirića. Tales tada nije znao da protrljan ćilibar ima magnetna svojstva, koja su posledica statičkog elektriciteta. Mnogo vekova kasnije nauka je dokazala vezu između magnetizma i elektriciteta.

Francuski fizičar Šarl-Ogist de Kulon (*Charles-Augustin de Coulomb*, 1736-1806) je 1785. godine formulisao zakon koji definiše intenzitet, pravac i smer elektrostatičke sile kojom nepokretno naelektrisanje malih dimenzija deluje na drugo.

Danski fizičar Hans Kristijan Ersted (*Hans Christian Ørsted*, 1777-1851) je otkrio vezu između pokretnog naelektrisanja i magnetizma. On je 1819. godine primetio da žica kroz koju protiče struja može da odbije namagnetisanu iglu kompasa. Međutim, Ersted nije ponudio objašnjenje ovog fenomena.

Tragajući za objašnjenjem fenomena koji je primetio Ersted, francuski fizičar Andre-Mari Amper (*André-Marie Ampère*, 1775-1836) je pokazao da dva paralelna otpornika, kroz koje protiče struja, privlače ili odbijaju jedan drugog u zavisnosti od toga da li su struje u istom ili suprotnom smeru. Već 1821. godine Amper formuliše teoriju elektrodinamike, u kojoj dejstvo jedne struje na drugu objašnjava elektromagnetnim efektom.

Engleski fizičar Majkl Faradej (*Michael Faraday*, 1791-1867) je 1831. godine formulisao zakon elektromagnetne indukcije. Električna struja je izvor magnetnog polja, dok magnetno polje indukuje električnu struju. Faradaj je prvi tvrdio da se elektromagnetni talasi šire u prostoru oko provodnika, premda taj eksperiment nikad nije dovršio.

Može se slobodno reći da istorija električnih telekomunikacija započinje 1830-ih godina.

Američki fizičar Džozef Henri (*Joseph Henry*, 1797-1878) je 1835. godine razvio elektromagnetni relej, koji je najvažniji deo električnog telegrafa. Prvi električni telegraf, nezavisno jedan od drugog, razvili su 1837. godine američki slikar i pronalazač Samjuel Morze (*Samuel Morse*, 1791- 1872) i Džozef Henri. Prvi transatlantski telegrafski kabl, koji je postavljen 1859. godine, omogućio je električnu telekomunikacionu vezu između Evrope i Severne Amerike.

Škotski matematičar i fizičar Džejms Maksvel (*James Clerk Maxwell*, 1831-1879) je 1864. godine zaokružio utemeljenje

elektromagnetike kao nauke. Ono predstavlja osnov mnogih budućih otkrića u elektrotehnici, kao što su električni transformator i električni generator, ali i čitave jedne nove oblasti – električnih telekomunikacija.

Telefon je razvio Aleksandar Bel (*Alexander Graham Bell*, 1847-1922) 1876. godine. Prve komercijalne telefonske usluge pojavile su se 1878. godine u SAD, a 1879. godine u Velikoj Britaniji. Prenos telefonskih signala između dva kontinenta postao je moguć tek 1953. godine, kada je postavljen prvi transatlantski telefonski kabl, koji je sadržao stotine elektronskih pojačavača.

Revolucija u telekomunikacijama započinje 1893. godine, kada je Nikola Tesla (1856-1943) pokazao da je moguć prenos poruka radio (bežičnim) putem. Značajan doprinos razvoju radio telekomunikacija dao je Giljermo Markoni (*Gugliermo Marconi*, 1874-1937), koji je 1901. godine uspostavio prvu transatlantsku radio telekomunikacionu vezu.

Prvi prenos pokretne slike na daljinu Džon Berd (*John Logie Baird*, 1888-1946) je ostvario 1925. godine. Već 1929. godine britanska radiodifuzna korporacija *BBC* (engl. *British Broadcasting Corporation*) je počela komercijalno emitovanje televizijskog programa.

Prvi prenos računarskih podataka Džordž Stibic (*George Stibitz*, 1904-1995) je izvršio 1940. godine, prva računarska mreža *ARPANET* (engl. *Advanced Research Projects Agency Network*) je realizovana 1969. godine, a računarski protokoli su nastali tokom 1970-tih godina.

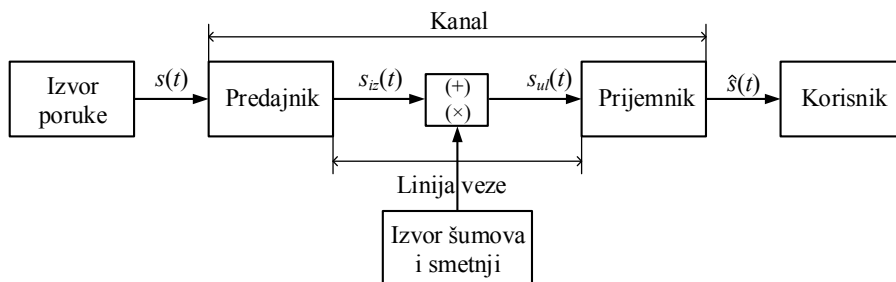
Lansiranje prvog satelita u SSSR-u 1957. godine, a zatim nekoliko satelita u SAD tokom 1960. godine, otvorili su eru satelitskih telekomunikacija.

Tokom 1980-tih godina počinje komercijalna upotreba mobilnih telefona i optičkih kablova. U narednoj deceniji nastaje globalna računarska mreža *Internet*. Prema proceni iz 2007. godine, 97% svih informacija u telekomunikacionim mrežama se razmeni putem Interneta, 2% putem mobilnih telefona, a preostalih 1% putem svih ostalih mreža. Podatak da je 2017. godine u svetu bilo 4,8 milijardi korisnika mobilnih telefona deluje zaista impresivno. Može se slobodno reći da su dve osnovne karakteristike savremenog društva na početku 21. veka: globalizacija svetske ekonomije i izuzetno brz razvoj i konvergencija informaciono-komunikacionih tehnologija (engl. *Information and Communications Technology – ICT*).

Ovako brz razvoj telekomunikacija nameće potrebu za preciznom zakonskom regulativom. Osnovna pravila u telekomunikacijama su regulisana na međunarodnom nivou. Najvažnije regulatorno telo je Međunarodna unija za telekomunikacije (engl. *International Telecommunications Union – ITU*), sa tri ogranka: *ITU-R* (radio), *ITU-T* (telefonija) i *ITU-D* (razvoj). Pored toga, postoje regulatorne agencije na regionalnim i nacionalnim nivoima.

2. MODEL TELEKOMUNIKACIONOG SISTEMA

Nakon upoznavanja sa najvažnijim pojmovima i kratkom istorijom telekomunikacija, u ovoj glavi je razmotren osnovni model telekomunikacionog sistema, koji je prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Osnovni model telekomunikacionog sistema

Kao što je već rečeno, zadatak telekomunikacija je prenos poruka od izvora poruke do korisnika.

Izvor poruke je čovek ili uređaj. Poruke se mogu svrstati u dve velike grupe: *kontinualne* i *diskretne* poruke.

Kontinualne poruke se pojavljuju kao kontinualne vremenske funkcije (govor, muzika, temperatura, pritisak, ...). Kontinualne poruke karakterišu vrednosti koje pripadaju skupu beskonačnog broja različitih vrednosti, pri čemu vrednosti iz ovog skupa imaju svoju minimalnu i maksimalnu vrednost.

Diskretne poruke se pojavljuju kao niz odvojenih, diskretnih elemenata – simbola. Simboli mogu biti slova, cifre, muzičke note, ... Skup svih mogućih simbola se zove *alfabet*. Jedno ili više slova formira reč, a jedna ili više cifara formira broj. Otuda se poruka sastoji od reči i brojeva. Izvor raspolaže konačnim brojem mogućih simbola, a šalje samo neke od njih, pri čemu korisnik zna sve moguće simbole, ali ne zna koji od njih će