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 poslediplomskih 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 Ž 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. M-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. Konvolucioni 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 *KAM* 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 *AM* modulatori 197
9.3.1. Princip realizacije *AM* 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 *AM* 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 *FM* modulatori 219
9.7. Analogni *FM* demodulatori 222
9.8. Optimalni filtar 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 Kantu[1], 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 preneta poruka postiže željeni efekat kod korisnika poruke.

[1] Imanuel 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 preneta poruka postiže željeni efekat kod korisnika – to je pitanje koje spada u oblast filosofije 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. semaforsku 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 semaforska 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 protiše 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.

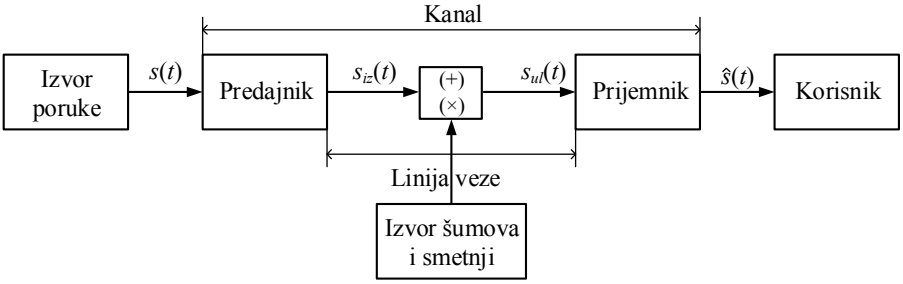
Lansiranje prvog satelita u SSSR-u 1957. godine, a zatim nekoliko satelita u SAD tokom 1960. godine, otvorili su eru satelitskih telekomunikacija.

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