

UNIVERZITET U ISTOČNOM SARAJEVU
Elektrotehnički fakultet



OSNOVI TELEKOMUNIKACIJA

MIRJANA MAKSIMOVIĆ
DARKO ŠUKA

Univerzitet u Istočnom Sarajevu - Elektrotehnički fakultet
Akademska misao

PREDGOVOR

Udžbenik „Osnovi telekomunikacija“ nastao je kao rezultat višegodišnjeg naučnog i nastavnog rada autora u oblasti telekomunikacija, sa ciljem upoznavanja čitaoca sa osnovnim konceptima i principima rada tradicionalnih i savremenih telekomunikacionih sistema.

Udžbenik „Osnovi telekomunikacija“ biće koristan izvor znanja za sve one koji žele da razumiju osnovne principe telekomunikacija. Sadržaj udžbenika je organizovan u osam poglavlja. U prvom poglavlju dat je kratak pregled istorijskog razvoja telekomunikacija, predstavljen je opšti model telekomunikacionog sistema te su definisani osnovni pojmovi u teoriji informacija. Drugo poglavlje je posvećeno signalima, njihovim karakteristikama i analizi istih. Sistemi za prenos signala predstavljeni su u trećem poglavlju. Analogne modulacije obrađene su u četvrtom poglavlju, dok su impulsne modulacije tema petog poglavlja. Osnovni principi prenosa digitalnih signala prezentovani su u šestom poglavlju. Digitalne modulacije i modulacije u proširenom spektru predstavljene su u poglavljima sedam i osam, respektivno.

Materijal prikazan u udžbeniku prvenstveno je nastao u toku pripreme predavanja iz predmeta „Osnovi telekomunikacija“, pa je shodno tome i namijenjen studentima osnovnog studija Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Istočnom Sarajevu za pripremu ispita iz navedenog predmeta.

Posebnu zahvalnost za izdvojeno vrijeme, korisne sugestije i dragocjene savjete dugujemo recenzentima prof. dr Mirjani Simić-Pejović i prof. dr Predragu Pejoviću. Zahvalnost dugujemo i Žarku Karadžiću – masteru elektrotehnike i računarstva, koji je dao značajan doprinos izradi ilustracija u udžbeniku.

U cilju budućeg unapređenja ovog udžbenika, sve sugestije i ideje čitalaca biće dobrodošle i sa zahvalnošću razmotrene.

Istočno Sarajevo, 2023. godine

Autori

Sadržaj

1 UVOD 1

1.1 KRATAK ISTORIJAT RAZVOJA TELEKOMUNIKACIJA 1
1.2 OPŠTI MODEL TELEKOMUNIKACIONOG SISTEMA 3
1.3 POJAM INFORMACIJE I MJERA ZA KOLIČINU INFORMACIJE 4

2 SIGNALI I NJIHOVA ANALIZA 6

2.1 KLASIFIKACIJA SIGNALA 6
2.2 ANALIZA DETERMINISTIČKIH SIGNALA 7
2.2.1 Harmonijska analiza periodičnih signala 9
2.2.2 Korelacija periodičnih signala 13
2.2.3 Autokorelacija periodičnih signala 14
2.2.4 Konvolucija periodičnih signala 16
2.2.5 Harmonijska analiza aperiodičnih signala 16
2.2.6 Korelacija aperiodičnih signala 18
2.2.7 Autokorelacija aperiodičnih signala 19
2.2.8 Konvolucija aperiodičnih signala 20
2.3 ANALIZA SLUČAJNIH SIGNALA 21
2.4 DISKRETIZACIJA ANALOGNIH SIGNALA 24
2.4.1 Diskretizacija signala po vremenu (odabiranje) 24
2.4.2 Diskretizacija signala po amplitudi (kvantizacija) 30
2.5 DIGITALIZACIJA SIGNALA 34
2.6 JEDINICE U OBRADI I PRENOSU SIGNALA U TELEKOMUNIKACIJAMA 35
2.7 KRITERIJUMI ZA OCJENU KVALITETA PRENOSA SIGNALA 36

3 SISTEMI ZA PRENOS SIGNALA 38

3.1 FUNKCIJA PRENOSA SISTEMA ZA PRENOS SIGNALA 38
3.2 IDEALAN SISTEM PRENOSA 40
3.3 PROPUSNI OPSEG SISTEMA ZA PRENOS 42
3.3.1 Idealni propusnik niskih frekvencija (NF filtar) 43
3.3.2 Idealni propusnik visokih frekvencija (VF filtar) 44
3.3.3 Idealni propusnik opsega frekvencija (PF filtar) 45
3.3.4 Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos 46
3.4. LINEARNA IZOBLIČENJA 50
3.4.1 Linearna amplitudska izobličenja 51
3.4.2 Linearna fazna izobličenja 52
3.4.3 Kombinovana izobličenja 55
3.5 BRZINA PRENOSA GRUPE I FAZE, GRUPNO KAŠNJENJE 56
3.6 NELINEARNA IZOBLIČENJA 58
3.6.1 Harmonijska izobličenja 59
3.6.2 Intermodulaciona izobličenja 61

4 ANALOGNE MODULACIJE 63

4.1 POTREBA ZA OBRADOM SIGNALA 63
4.2 ANALOGNE AMPLITUDSKE MODULACIJE (AM) 68
4.2.1 Amplitudska modulacija sa dva bočna opsega (AM-2BO) 68

4.2.2 Konvencionalna amplitudska modulacija (KAM) ... *71*
4.2.2.1 Bilans snage KAM signala ... 74
4.2.3 Amplitudska modulacija sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO) ... *76*
4.2.4 Amplitudska modulacija sa nesimetričnim bočnim opsezima (AM-NBO) ... *79*
4.2.5 Modulacija AM signala ... *79*
4.2.5.1 Realizacija produktne modulacije pomoću nelinearnog sklopa ... 80
4.2.5.2 Realizacija produktne modulacije pomoću prekidačkih sklopova ... 86
4.2.5.3 Realizacija produktne modulacije metodom varijacije parametara (parametarska modulacija) ... 95
4.2.6 Demodulacija AM signala ... *96*
4.2.6.1 Sinhrona ili produktna demodulacija ... 97
4.2.6.2 Asinhrona demodulacija (detektor anvelope) ... 100
4.2.7 Zaključna razmatranja o analognim AM modulacijama ... *102*
4.2.8 Frekvencijski multipleks ... *104*
4.3 ANALOGNE UGAONE MODULACIJE ... 106
4.3.1 Analogna fazna modulacija (ΦM) ... *109*
4.3.2 Analogna frekvencijska modulacija (FM) ... *109*
4.3.3 Veza između ΦM i FM modulacije ... *110*
4.3.4 Analiza spektra analogno ugaonih modulisanih signala ... *112*
4.3.5 Snaga ugaono modulisanih signala ... *117*
4.3.6 Modulacija ugaono modulisanih signala ... *118*
4.3.7 Demodulacija ugaono modulisanih signala ... *122*

5 IMPULSNE MODULACIJE ... 128

5.1 IMPULSNA AMPLITUDSKA MODULACIJA (IAM) ... 130
5.2 IMPULSNA MODULACIJA PO TRAJANJU (ITM) ... 132
5.3 IMPULSNA POLOŽAJNA MODULACIJA (IPM) ... 136
5.4 VREMENSKI MULTIPLEKS ... 140
5.5 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA O IMPULSNIM MODULACIJAMA ... 142
5.6 IMPULSNA KODNA MODULACIJA (IKM) ... 143
5.6.1 Vremenski multipleks sa IKM modulacijom ... *146*
5.6.2 Delta modulacija (DM) ... *149*
5.6.2.1 Adaptivna delta modulacija (ADM) ... 152
5.6.3 Diferencijalna impulsna kodna modulacija (DIKM) ... *154*
5.6.4 Zaključna razmatranja o IKM, DM i DIKM modulacijama ... *155*

6 OSNOVNI PRINCIPI PRENOSA DIGITALNIH SIGNALA 157

6.1 ELEKTRIČNO PREDSTAVLJANJE DISKRETNIH PORUKA I OBLICI DIGITALNIH SIGNALA ... 158
6.1.1 Oblici i vrste binarnih signala ... *160*
6.1.1.1 Unipolarni binarni signal bez povratka na nulu ... 161
6.1.1.2 Unipolarni binarni signal sa povratkom na nulu ... 162
6.1.1.3 Bipolarni binarni signal bez povratka na nulu ... 162
6.1.1.4 Bipolarni binarni signal sa povratkom na nulu ... 163
6.1.1.5 AMI kôd ... 164
6.1.1.6 Mančester kôd ... 165
6.1.1.7 Diferencijalno kodovan binarni signal ... 165
6.1.1.8 M-arni signal ... 168

6.1.2 Serijski i paralelni podaci i serijski i paralelni prenos ... *169*
6.2 PRENOS DIGITALNIH SIGNALA U OSNOVNOM OPSEGU FREKVENCIJA ... 170
6.2.1 Ograničenje propusnog opsega sistema i pojava intersimbolske interferencije ... *172*
6.2.2. Idealni sistem prenosa digitalnog signala u osnovnom opsegu ... *173*
6.3 NIKVISTOVI KRITERIJUMI ... 174
6.4 DIJAGRAM OKA ... 177
6.5 PROBLEM KOREKCIJE I TRANSVERZALNI FILTAR ... 179
6.6. UTICAJ SLUČAJNOG ŠUMA NA PRENOS DIGITALNOG SIGNALA U OSNOVNOM OPSEGU FREKVENCIJA ... 181
6.7 OPTIMIZACIJA SISTEMA ZA PRENOS U OSNOVNOM OPSEGU FREKVENCIJA ... 182
6.7.1 Optimizacija sistema kada ne postoji intersimbolska interferencija – optimalni filtar ... *184*
6.7.2 Optimizacija sistema u kome istovremeno treba ispuniti i uslove da ne dođe do intersimbolske interferencije ... *186*
6.8 PRENOS DIGITALNIH SIGNALA NA DALJINU ... 187

7 DIGITALNE MODULACIJE ... **189**

7.1. OPŠTI MODEL SISTEMA ZA DIGITALNI PRENOS SIGNALA ... 189
7.2. DIGITALNE AMPLITUDSKE MODULACIJE (ASK) ... 195
7.3. DIGITALNE FREKVENCIJSKE MODULACIJE (FSK) ... 202
7.4 DIGITALNE FAZNE MODULACIJE (PSK) ... 208
7.5. DIGITALNE HIBRIDNE MODULACIJE ... 219

8 MODULACIJE U PROŠIRENOM SPEKTRU ... **221**

8.1 DIREKTNA SEKVENCA ... 224
8.2 FREKVENCIJSKO SKAKANJE ... 227
8.3 KODNE SEKVENCE ... 230

LISTA SKRAĆENICA I TERMINA ... **233**

LITERATURA ... **236**

1 UVOD

Pojam komunikacija označava složen proces razmjene poruka između ljudi ili uređaja. Složenica *telekomunikacije* izvedena je od grčke riječi *tele,* što znači daleko i latinske riječi *communicare*, što znači razmjenjivati, saopštavati. Prema tome, telekomunikacije se mogu definisati kao oblast ljudske djelatnosti koja se bavi prenošenjem poruka između dva ili više učesnika na udaljenim mjestima. Danas su telekomunikacije jedna od ključnih grana moderne tehnologije koja je omogućila ljudima da premoste prostorne i vremenske barijere u komunikaciji. Telekomunikacije su neizostavan dio svakodnevnog života, od komunikacije preko mobilnih telefona i interneta, do satelitskih komunikacija, radija i televizije.

1.1 Kratak istorijat razvoja telekomunikacija

Iako se danas podrazumijeva da se prenos poruka između dva ili više učesnika na udaljenim mjestima odvija putem električnih signala, raniji oblici razmjenjivanja poruka su ostvarivani duvanjem u rogove, udaranjem u bubnjeve, formiranjem dimnih signala, slanjem signala putem ogledala, crtanjem na zidovima pećina, itd. S razvojem tehnologije, telekomunikacije su postale sve naprednije, omogućavajući prenos poruka na većim udaljenostima i s većom preciznošću.

Telekomunikacioni sistemi se mogu podijeliti na: telegrafiju, telefoniju, radio komunikacije i prenos podataka.

Istorija električnih telekomunikacija se vezuje za 1830-te godine i pojavu telegrafije koja se smatra najjednostavnijim i najstarijim praktičnim vidom komuniciranja električnim putem. Američki pronalazač Samuel Morz (engl. *Samuel Morse*) razvio je električni telegraf 1837. godine i za njegovu upotrebu izmislio je poseban kôd (Morzeov kôd) u kojem se za svako slovo abecede i za svaki broj koristi posebna kombinacija tačaka i linija.

Naredni veliki izum u svijetu telekomunikacija, te savršeniji vid prenosa poruka predstavlja telefonija. Telefon je izumio američki naučnik Aleksandar Graham Bel (engl. *Alexander Graham Bell*) 1876. godine. Daljnji napredak doveo je do zamjene klasičnih analognih sistema digitalnim, da bi današnji razvoj telefonije bio usmjeren ka integraciji različitih servisa i omogućavanju istovremene razmjene govora, teksta, slika ili podataka.

Revolucija u oblasti telekomunikacija započela je 1893. godine kada je Nikola Tesla pokazao da je moguć prenos poruka radio (bežičnim) putem. Pod pojmom *radio komunikacije* podrazumijevaju se sistemi u kojima se razmjena informacija ostvaruje korišćenjem fenomena elektromagnetskih talasa (radiotalasa). Italijanski

elektroinženjer Đuljielmo Markoni (ital. *Guglielmo Marconi*), usavršavajući tuđe i svoje pronalaske, osmislio je prve praktične realizacije radio veza. Prva prekookeanska radio telekomunikaciona veza ostvarena je 1901. godine. Koristeći elektromagnetske talase, danas se prenose i razmjenjuju sve vrste informacija: govor, zvuk, slika i/ili podaci.

Još u ranom razvoju telekomunikacija pojavile su se i ideje i težnje da se, pored poruka u vidu govora i pisane riječi, prenesu i slike. Škotski inženjer Džon Lodži Berd (engl. *John Logi Baird*) uspio je 1925. godine da ostvari prvi prenos pokretne slike na daljinu. Prvi redovni televizijski (TV) program realizovao je BBC (engl. *British Broadcasting Corporation*) u Londonu 1936. godine, dok prvi redovni program u Sjedinjenim Američkim Državama počinje sa emitovanjem 1939. godine.

Pod sistemom za prenos podataka podrazumijeva se telekomunikacioni sistem koji omogućava razmjenu informacija u obliku podataka. Agencija za napredne istraživačke projekte (engl. *Advanced Research Projects Agency* – ARPA) realizovala je 1969. godine prvu računarsku mrežu ARPANET, preteču današnjeg interneta.

Lansiranje telekomunikacionih satelita dovelo je do nove ere u oblasti telekomunikacija – satelitske telekomunikacije. Prvi satelit lansiran je 1957. godine u Savezu Sovjetskih Socijalističkih Republika, a 1960. godine nekoliko satelita je lansirano u Sjedinjenim Američkim Državama. Krajem 1967. godine u upotrebi je bilo 12 telekomunikacionih satelita.

Tokom osamdesetih godina prošlog vijeka počela je komercijalna upotreba mobilnih telefona i optičkih kablova. U narednim decenijama došlo je do brzog razvoja informaciono-komunikacionih tehnologija. Pravci razvoja telekomunikacija usmjereni su ka ekspanziji optičkih i satelitskih komunikacija, potpunoj digitalizaciji svih vrsta prenosa i razvoju integrisanih mreža za prenos različitih poruka i pružanje mnogih vrsta usluga.

Danas su u upotrebi različiti moderni komunikacioni sistemi i mediji, najčešće telefon, radio, televizija i internet, koji omogućavaju ljudima da se povežu i komuniciraju na globalnom nivou. Bez sumnje, telekomunikacije će i dalje ostati neizostavan dio ljudskog života i razvijati se kako bi olakšale i unaprijedile povezivanje i komuniciranje. Nesumnjivo, brzi razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija kreiraće nove moderne načine i sredstva komunikacije.

Veoma brz razvoj telekomunikacija nametnuo je potrebu za preciznom zakonskom regulativom. Međunarodna telekomunikaciona unija (engl.