

SLAVKO D. ŠAJIĆ

JOVAN N.GALIĆ

DIGITALNE TELEKOMUNIKACIJE

Univerzitet u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet
Banja Luka, 2019.

Autori:

Dr Slavko Šajić, Jovan Galić

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

DIGITALNE TELEKOMUNIKACIJE

I izdanje

Recenzenti:

Dr Milan Šunjevarić, redovni profesor u penziji

Dr Branislav Todorović, redovni profesor

Vojna akademija Beograd

Lektor:

Bojana Sarić

Izdavač:

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Štampa:

R Biro d.o.o Banja Luka

Tiraž: 100 primjeraka

ISBN: 978-99955-46-37-3

Na osnovu izvještaja recenzenata, saglasnost za publikovanje udžbenika kao univerzitetskog izdanja dali su Nastavno-naučno vijeće Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci (odluka broj 20/3.299-339/19 od 16.04. 2019. god.) i Senat Univerziteta u Banjoj Luci (odluka broj 02/04-3.895-42/19 od 07.05. 2019. god.).

PREDGOVOR

Komunikacije su opšti pojam za razmjenu informacija između živih bića, živih bića i automata, kao i razmjena informacija između automata. Od navedenih komunikacija, svakako komunikacija između ljudi je od prvenstvenog značaja. Od svog nastanka, ljudski rod je imao potrebu za komunikacijom. Ta komunikacija je vjerovatno u početku bila na primitivnom nivou sve do pojave prvog pisma, odnosno jezika. Razvojem ljudskog društva javljala se i potreba za prenosom informacija između međusobno udaljenih tačaka. U početku za obavljanje ove komunikacije su se koristili golubovi pismonoše, dimni signali, svjetlosni signali itd. Za navedene komunikacije možemo reći da su početak prvih telekomunikacija. Moderne telekomunikacije možemo vezati za 19. vijek, odnosno pojavu telegrafa a kasnije i telefonije. Mada se telegrafija kao digitalni postupak prenosa informacija javila ranije od analognog prenosa (telefonija), dugo vremena u prenosu informacija su dominirali analogni postupci prenosa informacija. Ova dominacija je trajala sve do saznanja da se kontinualni analogni signali mogu prenositi u digitalnom obliku, ukoliko se nad analognim signalom izvrše operacije koje će analogni signal konvertovati u odgovarajuću digitalnu formu (*Alec Reeves*, 1938. godina). Od tada počinje intenzivan razvoj digitalnih postupaka prenosa informacija. Prenos signala u analognoj formi je zahtijevao manji propusni opseg od digitalnog prenosa, ovaj odnos se u posljednje vrijeme značajno promijenio u korist digitalnog prenosa koji nudi mnoge prednosti nad analognim, od kojih su najznačajnije: digitalnim signalima se mnogo lakše manipulira od analognih signala (npr. lakše ih je multipleksirati), kodovanjem se lako može obezbijediti privatnost, veća otpornost na šum i smetnje u prenosnom kanalu, mogućnost ispravljanja grešaka primjenom zaštitnog kodovanja, kompresijom podataka nad digitalnim signalom može da se smanji potreban propusni opseg za prenos signala, tako da on bude manji od opsega potrebnog za prenos originalnog analognog signala itd.

Imajući gore navedeno u vidu, može se zaključiti važnost razvoja digitalnih telekomunikacija za razmjenu informacija u savremenom društvu. Takođe, za očekivati je da će budući komunikacioni sistemi biti integrisana digitalna mreža, bazirana isključivo na digitalnim postupcima prenosa i obrade informacija. Na osnovu navedenog, autori su se odlučili da kroz pisanje ove knjige što više približe čitaocima problematiku vezanu za digitalni prenos i obradu informacija. Naravno,

naše izlaganje je podrazumijevalo da čitalac raspolaže sa osnovnim znanjima iz osnova telekomunikacija (spektralna analiza, transfer funkcija sistema, analogne modulacije, analogni i digitalni filtri itd.).

Cjelokupna materija je podijeljena u deset glava.

U prvoj glavi je dat istorijski pregled razvoja telekomunikacija iz kojeg se vidi hronološki razvoj ove oblasti. Pored interesantnih detalja, može se zaključiti brz razvoj ove naučne discipline koja značajno doprinosi uspješnoj saradnji među narodima.

U drugoj glavi izneseni su postupci obrade analognog signala u procesu njegove digitalizacije. U okviru toga obrađena je teorema o odmjeravanju koja definiše jedan od najvažnijih postupaka obrade signala u savremenim telekomunikacijama i u suštini ona predstavlja vezu koja spaja vremenski kontinualne i diskretne signale. Takođe, obrađena su i dva preostala postupka u procesu digitalizacije kontinualnog signala a to su kvantovanje signala po amplitudi i kodovanje kvantovanog signala. Posebna pažnja je posvećena impulsnoj kodnoj modulaciji (eng. *Pulse Code Modulation - PCM*), kao jednom od prvih postupaka digitalnog prenosa. U istoj glavi je dat još jedan krajnje jednostavan način digitalizacije analognog signala-delta modulacija, koja se danas često koristi naročito za digitalizaciju govornog signala.

Treća glava obrađuje postupak skremblovanja. Da bi olakšali projektovanje i učinili efikasnim prenos različitih vrsta digitalnih signala posredstvom integrisanih digitalnih prenosnih sistema, pribjegava se postupku dobijanja digitalnog niza koji ima iste statističke osobine bez obzira na statističke osobine ulaznih nizova koji potiču iz različitih izvora. Ovaj postupak se obično naziva skremblovanje. Drugim riječima, skremblovanjem se generiše slučajni niz koji nema memoriju tako da podaci dobiju osobine slučajnog niza, čime se znatno smanjuje vjerovatnoća pojave dugačkih nizova "1" ili "0", što utiče na poboljšanje performansi sinhronizacije. Isto tako, postupkom skremblovanja obezbeđuje se visok stepen transparentnosti prenosnog sistema, a pri tome se ne unosi redundantnost u prenošenu informaciju. Takođe, u okviru ove glave dat je način generisanja i osobine linearnih sekvenci maksimalne dužine.

U četvrtoj glavi su analizirani linijski signali kao fizički nosioci informacija. Takođe, data je njihova komparativna analiza po pitanju: ekstrakcije takta, spektralne efikasnosti, otpornosti na kanalni šum, mogućnosti detekcije i eventualne korekcije kanalnih grešaka i transparentnosti.

Peta glava je posvećena uskopojasnim digitalnim modulacijama. U okviru toga je prvo dat prikaz signala u prostoru signala, a zatim su analizirane binarne digitalne modulacije, spektralno efikasne digitalne modulacije i višenivovske digitalne modulacije. Za navedene modulacione postupke su analizirani odgovarajući

modulatori i demodulatori. Na kraju je izvršena komparativna analiza digitalnih modulacionih postupaka u pogledu vjerovatnoće greške u prenosnom kanalu.

U šestoj glavi je obrađena *OFDM* tehnika modulacije (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM*), odnosno prenos sa više paralelnih nosilaca. Ova tehnika u kombinaciji sa *M*-arnim modulacijama predstavlja baznu modulaciju u sistemima za bežičnu digitalnu audio i video difuziju. Razvojem signal procesora i algoritma brze Fourierove transformacije (eng. *Fast Fourier Transform - FFT*), *OFDM* postaje jedna od ključnih tehnika modulacije u telekomunikacionim sistemima.

Sedma glava obrađuje osnovne principe zaštitnog kodovanja i dekodovanja digitalnih informacija. U okviru toga analizirani su koderi i dekoderi za blok i konvolucione kodove, pri čemu je posebna pažnja posvećena *Viterbi*-jevom algoritmu za dekodovanje konvolucionih kodova.

Osma glava je posvećena trellis kodovanoj modulaciji (eng. *Trellis Coded Modulation - TCM*) kao združenom postupku modulacije i kodovanja. Isto tako, dati su osnovni principi kao i performanse koje nudi ovaj vid modulacije i kodovanja.

U devetoj glavi je obrađena sinhronizacija digitalnih sistema na fizičkom nivou, gdje je posebna pažnja posvećena sklopovima za sinhronizaciju talasa nosioca i sklopovima za bitsku sinhronizaciju. Takođe, analiziran je i uticaj nesavršenosti sinhronizacije na vjerovatnoću greške u kanalu za neke tipove modulacije.

U desetoj glavi su izloženi osnovni principi prenosa signala u proširenom spektru, u okviru čega su obrađene dvije najčešće korišćene tehnike: direktna sekvenca (eng. *Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS*) i frekvencijsko skakanje (eng. *Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS*). Poseban osvrt je dat na formiranje kodnog multipleksa na bazi navedenih tehnika prenosa. S obzirom na specifičnosti prenosa u proširenom opsegu, u istoj glavi su obrađeni principi uspostavljanja i održavanja kodne sinhronizacije ovih sistema. Na kraju ove glave su date osnovne vrste višestrukog pristupa sa odgovarajućom komparativnom analizom.

Na kraju, recimo da je knjiga prvenstveno namijenjena studentima Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci, kao i svim fakultetima i višim školama koje u svom nastavnom procesu izučavaju gore navedenu problematiku.

Zahvaljujemo se lektoru, Bojani Sarić, koja je svojim savjetima pomogla da tekst bude jezički i gramatički što korektniji.

Takođe, autori iskazuju posebnu zahvalnost recenzentima, prof. dr Milanu Šunjevariću i prof. dr Branislavu Todoroviću, na uloženom trudu prilikom čitanja materijala, kao i na korisnim sugestijama i primjedbama.

Bez obzira na pažnju, svjesni smo činjenice da su u prvom izdanju neke greške sasvim moguće. Bićemo zahvalni svim studentima i drugim čitaocima ako nam dostave uočene greške, pa čak i ako su samo pretpostavljene.

Banja Luka, januar 2019. godine

AUTORI

Uspomeni na našeg dragog profesora
ĐEMALA H. KOLONIĆA
ovu knjigu posvećuju

AUTORI

Sadržaj

<u>1. UVOD.....</u>	<u>1</u>
<u>2. KOVERZIJA ANALOGNIH U DIGITALNE SIGNALNE</u>	<u>3</u>
2.1 MODEL DIGITALNOG PRENOSNOG SISTEMA	3
2.2 TEOREMA ODMJERAVANJA.....	5
2.3 IMPULSNE MODULACIJE	15
2.4 KVANTOVANJE SIGNALA	16
2.4.1 UNIFORMNO KVANTOVANJE	18
2.4.2 SREDNJA SNAGA I SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE GREŠKE KVANTOVANJA	19
2.4.3 NEUNIFORMNO KVANTOVANJE.....	21
MI-KARAKTERISTIKA KOMPRESIJE	22
A-KARAKTERISTIKA KOMPRESIJE	23
2.5 KODOVANJE	24
2.6 IMPULSNA KODNA MODULACIJA – IKM.....	25
2.6.1 DIFERENCIJALNA IMPULSNA KODNA MODULACIJA	29
2.7 DELTA MODULACIJA	31
2.7.1 ORDINARNA DELTA MODULACIJA	32
2.7.2 ADAPTIVNA DELTA MODULACIJA-ADM	37
<u>3. SKREMBLOVANJE</u>	<u>41</u>
3.1 BINARNI PSEUDOSLUČAJNI NIZ.....	44
3.1.1 OSOBINE LINEARNIH PN SEKVENCI MAKSIMALNE DUŽINE	47
3.2 VRSTE SKREMBLERA	52
<u>4. LINIJSKI SIGNALI.....</u>	<u>55</u>
4.1 SPEKTRI NEKIH BINARNIH SIGNALA	57
4.1.1 UNIPOLARNI BINARNI SIGNAL (NRZ)	57
4.1.2 BIPOLARNI BINARNI SIGNAL (NRZ).....	59
4.1.3 ALTERNATIVNO BIPOLARNI BINARNI SIGNAL (AMI)	60
4.1.4 MANCHESTER LINIJSKI SIGNAL	60
4.2 KOMPARATIVNI OSVRT NA OSNOVNE LINIJSKE SIGNALNE	60
<u>5. DIGITALNE USKOPOJASNE MODULACIJE.....</u>	<u>63</u>

5.1 UVOD	63
5.2 GEOMETRIJSKI PRIKAZ SIGNALA	64
5.3 PREDSTAVLJANJE ŠUMA	72
5.4 VJEROVATNOĆA GREŠKE U BINARNOM PRENOSU	73
5.5 BINARNA AMPLITUDSKA MODULACIJA (BASK-OOK)	79
5.5.1 KOHERENTNA DEMODULACIJA BASK (OOK) SIGNALA	80
5.5.2 NEKOHERENTNA DEMODULACIJA BASK (OOK) SIGNALA	82
5.5.3 SPEKTRALNA GUSTINA SNAGE BASK.....	83
5.6 BINARNA FAZNA MODULACIJA (BPSK)	84
5.6.1 KOHERENTNA DEMODULACIJA BPSK SIGNALA (CPSK)	85
5.6.2 DIFERENCIJALNA FAZNA MODULACIJA-DPSK	86
5.6.3 SPEKTRALNA GUSTINA SNAGE BPSK SIGNALA	89
5.7 BINARNA FREKVENCIJSKA MODULACIJA (BFSK)	89
5.7.1 KOHERENTNA DEMODULACIJA BFSK SIGNALA	92
5.7.2 NEKOHERENTNA DEMODULACIJA BFSK SIGNALA	92
5.7.3 SPEKTRALNA GUSTINA SNAGE BFSK SIGNALA	94
5.8 POREĐENJE OSNOVNIH BINARNIH MODULACIONIH POSTUPAKA	95
5.9 SPEKTRALNO EFIKASNE DIGITALNE MODULACIONE TEHNIKE	97
5.9.1 QPSK (QUADRATURE PSK)	97
5.10.2 OQPSK	101
5.10.3 MSK MODULACIJA	102
5.10.4 GMSK.....	108
5.11 M-ARNE MODULACIJE	110
5.11.1 M-ARNA AMPLITUDSKA MODULACIJA (M-ASK)	111
5.11.2 M-ARNA FAZNA MODULACIJA (M-PSK)	116
5.11.3 M-ARNA KVADRATURNAMODULACIJA (M-QAM)	120
5.11.4 M-FSK MODULACIJE	125
5.11.4.1 Demodulacija M-FSK signala.....	126
5.11.5 POREĐENJE M-ARNIH TEHNIKA PRENOSA	128
<u>6. OFDM</u>	<u>131</u>
6.1 OFDM-OSNOVNI PRINCIPI	132
6.1.1 PRINCIPSKA BLOK ŠEMA OFDM-A	134
6.1.2 ZAŠTITNI INTERVAL (GUARD INTERVAL).....	138
6.1.3 UOBLIČAVANJE SPEKTRA OFDM SIGNALA	140
6.1.4 ODNOS VRŠNE PREMA SREDNJOJ SNAZI (PARP)	141
6.1.5 FUNKCIONALNA BLOK ŠEMA OFDM SISTEMA	141
6.2 SINHRONIZACIJA OFDM SISTEMA	143
<u>7. ZAŠTITNO KODOVANJE</u>	<u>151</u>

7.1 KAPACITET KANALA	151
7.2 BINARNI SIMETRIČNI KANAL	154
7.3 HAMMING-OVO RASTOJANJE.....	155
7.4 BLOK KODOVI	155
7.4.1 ZAŠTITNO KODOVANJE PONAVLJANJEM PORUKE	156
7.4.2 KODOVI S PROVJERAMA NA PARNOST	157
7.4.3 HAMMING-OVI KODOVI	159
7.5 KONVOLUCIONI KODOVI	162
7.5.1 TRELIS.....	165
7.5.2 GENERIŠUĆI POLINOMI.....	167
7.5.3 DEKODOVANJE KONVOLUCIONIH KODOVA	168
7.6 KODOVANJE ZA KANALE SA PAKETSKIM GREŠKAMA	173
<u>8. TRELIS KODOVANA MODULACIJA</u>	<u>177</u>
8.1 TCM-QPSK	180
8.2 TCM-8PSK	181
<u>9. SINHRONIZACIJA</u>	<u>187</u>
9.1 UTICAJ FAZNE RAZDEŠENOSTI NA VJEROVATNOĆU GREŠKE	189
9.2 UTICAJ RAZDEŠENOSTI EKSTRAKTORA TAKTA NA VJEROVATNOĆU GREŠKE	191
9.3 REGENERACIJA NOSEĆE UČESTANOSTI.....	192
9.3.1 SINHRONIZACIJA NOSIOCA NA BAZI PLL.....	193
9.4 EKSTRAKCIJA BITSKOG TAKTA	195
<u>10. PRENOS U PROŠIRENOM SPEKTROU</u>	<u>199</u>
10.1 UVOD	199
10.2 BINARNE SEKVENCE	200
10.2.1. PSEUDO-SLUČAJNE BINARNE SEKVENCE	201
10.2.2. HAOTIČNE SEKVENCE	204
10.2.3. SLUČAJNE BINARNE SEKVENCE	206
10.2.4. BINARNE SEKVENCE U SISTEMIMA ZA KRIPTOZAŠTITU	206
10.3 PROŠIRIVANJE I SUŽAVANJE SPEKTRA	209
10.3 DIREKTNA SEKVENCA - DS.....	215
10.3.1 PPS-DS MULTIPLEKS NA BAZI AUTOKORELACIONE FUNKCIJE PN SEKVENCE.....	219
10.3.2 PPS-DS MULTIPLEKS NA BAZI MEĐUKORELACIONIH FUNKCIJA.....	225
10.4 PRENOS FREKVENCIJSKIM SKAKANJEM (FH-SS)	230
10.4.1 PROCESNO POJAČANJE U FH SISTEMIMA	233
10.4.2 FH MULTIPLEKS	234

10.5 SINHRONIZACIJA SISTEMA U PROŠIRENOM SPEKTRU	235
10.5.1 SERIJSKA SINHRONIZACIJA DS SISTEMA	236
10.5.2 SERIJSKA SINHRONIZACIJA FH SISTEMA	239
10.5.3 ODRŽAVANJE KODNE SINHRONIZACIJE.....	241
10.5.3.1 Petlja sa diferencijalnim kašnjenjem-DLL	241
10.5.3.2 Tau-diter petlja - TDL	243
10.6 VIŠESTRUKI PRISTUP	245
10.6.1 UVOD	245
10.6.2 TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA.....	246