Predgovor

Ovaj udžbenik je prilagođen studentima Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu koji znanja o telekomunikacijama stiču najvećim delom u okviru jednog kursa. Udžbenik se oslanja na višegodišnje iskustvo autora u držanju nastave iz većeg broja predmeta na osnovnim akademskim studijama. Pisan je tako da predstavlja osnovnu literaturu na predmetu Osnovi telekomunikacija, koji je obavezan predmet na trećoj godini studijskog programa Elektrotehnika i računarstvo, modul Računarska tehnika i informatika. Predviđeno je da se udžbenik koristi i u izvođenju nastave na predmetu Principi modernih telekomunikacija, koji studenti mogu pratiti u drugoj godini studijskog programa Softversko inženjerstvo.

Imajući u vidu nivo studija na kome će se udžbenik koristiti, autori su se posebno trudili da materiju izlože na jasan i razumljiv način, primeren predznanju studenata. Primeri koji detaljnije objašnjavaju izloženo gradivo su pažljivo odabrani, a prateće originalne ilustracije na intuitivan način čitaocu približavaju složene pojmove i procese. Pored osnova digitalnih telekomunikacija, u udžbeniku je ukratko opisan i veći broj značajnih savremenih telekomunikacionih sistema. Zato verujemo da udžbenik može biti koristan i širem krugu čitalaca.

Telekomunikacije kao naučna disciplina postoje više od sto pedeset godina, ali je posebno dinamičan razvoj ova oblast elektrotehnike doživela tek tokom prethodnih decenija. Prvi telekomunikacioni sistemi namenski su projektovani za prenos samo jedne vrste poruka. Danas se očekuje da se raznorodne poruke pouzdano prenose kroz izabrani fizički medijum, pri čemu postoje konstantni zahtevi korisnika da prenos poruka bude što brži. Digitalni telekomunikacioni sistemi zadovoljavaju sve navedene zahteve, što je i razlog njihove gotovo isključive zastupljenosti u savremenim komunikacijama.

Digitalne telekomunikacije predstavljaju oblast u kojoj su teorijske ideje imale presudan uticaj na izbor praktičnih rešenja. Krajnje granice efikasnosti i pouzdanosti bilo kog telekomunikacionog sistema određene su osnovnim postulatima teorije informacija još 1948. godine. Godinama su ove teorijske granice inženjerima samo ukazivale na to koliko bi neki budući sistemi mogli da rade brže i pouzdanije. U poslednjim decenijama XX veka, široka dostupnost digitalne tehnologije omogućila je da se telekomunikacioni sistemi projektuju upravo u skladu sa principima teorije informacija. Ovo je dovelo do pojave sistema koji dostižu teorijske granice, a koji su zajedno sa novim konceptima arhitekture sistema stvorili preduslove za pojavu Interneta.

Osnovni cilj ovog udžbenika je da se izlože sistemski aspekti digitalnih telekomunikacija. Prvo je predstavljena teorija koja određuje fundamentalna ograničenja koja ni jedan telekomunikacioni sistem ne može da prevaziđe. Zatim su izloženi algoritmi i postupci koji omogućavaju efikasnu obradu i pouzdan prenos poruka. U digitalnim telekomunikacionim sistemima poruke se po pravilu predstavljaju u obliku binarne sekvence, koja se pre slanja u kanal uvek predstavlja digitalnim signalom. Poznavanje osobina slučajnih signala omogućava da se pri projektovanju sistema predvide njegove osobine. U cilju prenosa digitalnog signala danas se primenjuje čitav niz tehnika zasnovanih na obradi signala. Postupak detekcije omogućava pouzdan prenos poruka kroz kanal sa smetnjama. Prenos digitalnog signala kroz radio kanal postiže se modulacijom, dok tehnike multipleksiranja i višestrukog pristupa omogućavaju da više korisnika istovremeno dele zajedničke resurse. Konačno, dat je i pregled savremenih telekomunikacionih sistema i objašnjeni su osnovni principi njihovog rada, a posebno su razmotrene tehnologije za pristup Internetu.

Brz razvoj tehnologije pratilo je i objavljivanje brojnih naučnih i stručnih publikacija u kojima su opisani novi telekomunikacioni sistemi i servisi. Autori ove knjige su se trudili da iz postojeće literature na srpskom jeziku preuzmu sve termine koji su se pokazali adekvatnim, ali su neki pojmovi zadržani bez prevoda, jer su upravo u takvom obliku široko prihvaćeni. Imajući u vidu da je originalna literatura iz ove oblasti po pravilu pisana na engleskom jeziku, pri uvođenju pojedinih pojmova uvek su navedeni i originalni nazivi na engleskom jeziku, kao i odgovarajuće skraćenice.

Udžbenik sadrži dvanaest glava, pri čemu je prof. dr Predrag Ivaniš u najvećoj meri napisao uvod, glave u kojima je izložena materija vezana za kompresiju, zaštitno kodovanje i kriptografiju, kao i deo u kome su opisane tehnologije za pristup Internetu. Doc. dr Vesna Blagojević najvećim je delom autor glava u kojima je izložena materija vezana za analizu signala i sistema, konverziju signala u digitalni oblik, prenos i detekciju digitalnog signala, digitalne modulacije i višestruki pristup.

Autori se zahvaljuju recenzentima prof. dr Dušanu Drajiću, prof. dr Aleksandru Neškoviću i prof. dr Milu Tomaševiću na korisnim sugestijama. Takođe smo veoma zahvalni doc. dr Srđanu Brkiću koji je pripremio materijal za odeljak 2.7 i prof. dr Goranu T. Đorđeviću sa Elektronskog fakulteta u Nišu na brojnim diskusijama koje su doprinele konačnom izgledu ovog udžbenika.

Autori

Sadržaj

1 Uvod 1
1.1 Prvi telekomunikacioni sistem 3
1.2 Digitalna telefonija 5
1.3 Osnovni telekomunikacioni resursi 7
1.4 Bežični telekomunikacioni sistemi 9
1.5 Arhitektura digitalnog telekomunikacionog sistema 11
1.5.1 Interfejs izvora 12
1.5.2 Interfejs kanala 13
1.5.3 Binarni interfejs 14
1.5.4 Detaljnija blok šema digitalnog telekomunikacionog sistema 15

2 Kompresija podataka 17
2.1 Količina informacija i entropija 18
2.2 Statistički kodovi 20
2.3 Hafmenov kod 22
2.4 Prva Šenonova teorema 27
2.5 Izvori s memorijom 31
2.6 Lempel-Zivov algoritam 36
2.7 *Bzip* postupak kompresije 38

3 Zaštitno kodovanje 43
3.1 Zaštitni kod sa ponavljanjem 45
3.2 Druga Šenonova teorema 49
3.3 Blok kodovi 53
3.4 Linearni blok kodovi 55
3.5 Hemingovi kodovi 59
3.5.1 Skraćeni Hemingovi kodovi 64
3.5.2 Prošireni Hemingovi kodovi 66
3.6 Interliving 68
3.7 Ciklični kodovi 72
3.7.1 Ciklična provera redundanse (CRC) 74

4 Kriptografija i kriptoanaliza 77
4.1 Šifra transpozicije 79
4.2 Šifra supstitucije 81
4.3 Pojam perfektne tajnosti 85
4.4 DES algoritam 88
4.5 AES algoritam 91
4.6 Difi-Helmanov algoritam 92
4.7 RSA algoritam 94

5 Spektralna analiza telekomunikacionih signala 97
5.1 Periodični signali i pojam spektra 99
5.1.1 Određivanje spektra periodičnog signala 102
5.1.2 Značaj spektralnih komponenti 107
5.1.3 Uticaj parametara periodičnog signala na oblik spektra 109
5.2 Spektri aperiodičnih signala 111
5.2.1 Usamljeni pravougaoni impuls 111
5.2.2 Najvažnije osobine Furijeove transformacije 115
5.3 Slučajna povorka pravougaonih impulsa 120
5.4 Spektralna analiza slučajnih signala 123
5.5 Gausovi slučajni procesi i termički šum 125

6 Prenos signala kroz kanal 129
6.1 Pojam i opis sistema za prenos 131
6.2 Određivanje funkcije prenosa i idealan sistem prenosa 135
6.3 Analogni filtri 137
6.4 Impulsni odziv NF filtra 142
6.5 Linearna amplitudska i fazna izobličenja 144
6.6 Nelinearan sistem prenosa 146
6.7 Prolazak signala i šuma kroz filtar propusnih niskih učestanosti 148
6.8 Prolazak signala i šuma kroz filtar propusnik opsega učestanosti 150
6.9 Amplitudska modulacija 152
6.10 Multipleksiranje na bazi frekvencijske raspodele 154

7 Digitalizovanje signala 157
7.1 Diskretizacija kontinualnog signala 159
7.1.1 Idealna diskretizacija signala 159
7.1.2 Rekonstrukcija kontinualnog signala 165
7.1.3 Praktično ostvariv postupak diskretizacije 169
7.2 Kvantizacija signala 172
7.2.1 Ravnomerna (uniformna) kvantizacija 172
7.2.2 Neravnomerna kvantizacija 179
7.3 Multipleksiranje na bazi vremenske raspodele 184

8 Prenos digitalnog signala 189
8.1 Digitalni signali 190
8.1.1 Osnovni binarni digitalni signali 190
8.1.2 Spektralna gustina srednje snage binarnih digitalnih signala 194
8.1.3 Digitalni signali sa više amplitudskih nivoa 198
8.2 Prenos digitalnog signala u ograničenom opsegu učestanosti 202
8.2.1 Uticaj intersimbolske interferencije 204
8.3 Nikvistov kriterijum 207
8.3.1 Idealni Nikvistov filtar 208
8.3.2 Filtri sa kosinusoidalnim zaobljenjem 212

9 Detekcija digitalnog signala u šumu 217
9.1 Binarno signaliziranje 218
9.1.1 Binarno polarno NRZ signaliziranje 223
9.1.2 Binarno unipolarno NRZ signaliziranje 227
9.2 Signaliziranje sa više nivoa 230
9.2.1 Verovatnoća greške po simbolu 232
9.2.2 Verovatnoća greške po bitu 233
9.3 Optimalni prijemnik 235
9.4 Prenos u sistemu sa više deonica 239

10 Digitalne modulacije 243
10.1 Binarne modulacione tehnike 244
10.1.1 Binarna amplitudska modulacija 244
10.1.2 Binarna frekvencijska modulacija 247
10.1.3 Binarna fazna modulacija 250
10.2 M-arni modulacioni postupci 256
10.2.1 *M*-arna amplitudska modulacija 256
10.2.2 *M*-arna frekvencijska modulacija 257
10.2.3 QPSK i prenos nosiocima u kvadraturi 258
10.2.4 *M*-arna fazna modulacija 264
10.2.5 Kvadraturna amplitudska modulacija 268

11 Tehnike multipleksiranja i višestrukog pristupa 273
11.1 Dupleksiranje 273
11.2 Multipleksiranje 275
11.3 Višestruki pristup 279
11.3.1 FDMA 280
10.3.2 TDMA 281
10.3.3 CDMA 282
10.3.4 OFDMA 283
10.3.5 SDMA 285
10.3.6 Slučajni pristup 288

12 Tehnologije za pristup Internetu 291
12.1 Fiksni pristup korišćenjem PSTN mreže 295
12.2 Fiksni pristup korišćenjem digitalne pretplatničke linije 297
12.3 Fiksni pristup postavljanjem optičkih kablova do krajnjeg korisnika 302
12.4 Fiksni pristup korišćenjem kablovske distributivne mreže 305
12.5 Žično povezivanje krajnjih korisničkih terminala 306
12.6 Bežično povezivanje krajnjih korisničkih terminala 309
12.7 Bežični širokopojasni pristup Internetu preko satelita 315
12.8 Bežični širokopojasni pristup Internetu preko mobilne mreže 320

Literatura 327

Indeks 333

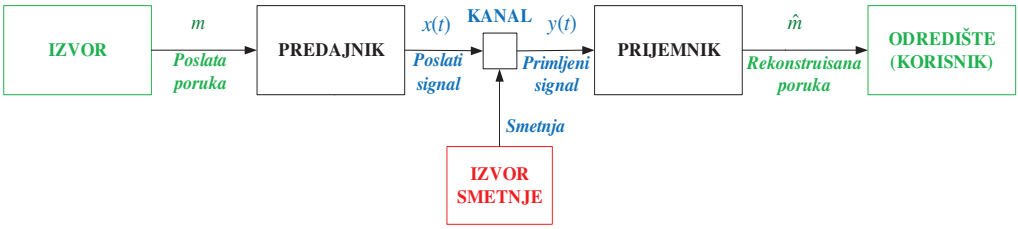
1 Uvod

Od nastanka ljudske vrste vršena je razmena verbalnih i neverbalnih poruka između jedinki. Može se reći da bez komunikacije ne bi ni bilo nastanka civilizacije. Danas se smatra da komunikacija predstavlja bilo koji način prenošenja poruke od pošiljaoca do primaoca. Razvoj prvih slova omogućio je da se komunikacija odvija i u pisanoj formi, tako da se misli i ideje saopštene u jednom trenutku mogu pročitati stotinama godina kasnije. Sa daljim razvojem ljudskog društva, javila se potreba da se savlada i prostorna barijera pri komunikaciji. U istoriji je zabeleženo više pokušaja brzog prenosa poruka na daljinu, počev od duvanja u rog, udaranja u tam-tam bubnjeve i slanja dimnih signala, pa do korišćenja goluba pismonoša i svetlosne signalizacije putem semafora i svetionika. Zabeleženo je da je Poni Ekspres obezbeđivao dostavu pošte od istočne do zapadne obale SAD za svega deset dana, pri čemu je za 16 meseci rada izgubljen samo jedan paket. Iako ovaj podatak svedoči o brzini i pouzdanosti servisa (paketi se ponekad gube i u najsavremenijim sistemima za prenos podataka!), Poni Ekspres je bankrotirao 1861. godine zbog pojave električnog telegrafa. Upravo se početak komercijalne upotrebe električnog telegrafa smatra trenutkom nastanka telekomunikacija.

Unapređenja telegrafske mreže ubrzo dovode do pojave telefonije, koja je omogućila prenos govora na velike udaljenosti. Digitalizacija telefonske mreže omogućila je da se ona proširi do praktično svakog domaćinstva u razvijenijim delovima sveta. Ubrzo je omogućena razmena podataka između računara smeštenih u domovima korisnika telefonske mreže, a razvoj računarskih telekomunikacija doveo je do pojave svetske mreže (Interneta). Paralelno je tekao razvoj bežičnih telekomunikacija, pa se prvi radovi Tesle (*Никола Тесла*), Popova (*Алексáндр Степáнович Попóв*) i Markonija (*Guglielmo Giovanni Maria Marconi*) na polju bežične telegrafije pojavljuju krajem XIX i početkom XX veka. Narednih decenija realizovan je radio prenos audio i video signala, a sa izbijanjem Drugog svetskog rata pažnja istraživača je uglavnom usmerena na izgradnju vojnih komunikacionih i radarskih sistema. Šezdesetih godina XX veka ubrzano se razvijaju radio sistemi za komunikaciju sa satelitima i objektima u dubokom svemiru. Razvoj digitalne i mikrotalasne elektronike tokom narednih decenija omogućio je brzo širenje mobilne telefonije, čime je pretplatnicima omogućena komunikacija u pokretu. Savremeni mobilni radio sistemi omogućavaju brz i pouzdan prenos raznih vrsta poruka uz veoma mala kašnjenja, širokopojasni pristup Internetu i mogućnost povezivanja velikog broja raznovrsnih komunikacionih uređaja.

Reč ***telekomunikacije*** nastala je od grčke reči τηλε (daljina) i latinske reči commūnicāre (deliti), pa se može reći da se telekomunikacije bave načinima saopštavanja poruke na daljinu. Jedna od najšire prihvaćenih definicija jeste da *telekomunikacije predstavljaju prenos poruka sa jedne na drugu lokaciju, posredstvom elektromagnetnih talasa*. Danas se smatra da ***telekomunikacioni sistem*** predstavlja svaki niz međusobno povezanih uređaja čija je osnovna namena da omogući pouzdan prenos poruka na udaljenu lokaciju, kroz sledeći niz postupaka:

- *izvor* generiše ***poruke***: *govor, muziku, video, tekst, sliku, niz binarnih simbola*;
- u ***predajniku*** se svaka poruka predstavlja, sa određenom dozom preciznosti, odgovarajućim *signalom* (električnim, vidljivim ili čujnim) i vrši se pretvaranje tog signala u oblik koji je pogodan za njegov prenos preko fizičkog medijuma koji se koristi;
- posredstvom ***kanala*** (*linije veze*) vrši se *prenos signala* u koji je utisnuta poruka;
- u ***prijemniku*** se vrši obrada primljenog signala i *rekonstruisanje poruke iz signala*;
- *korisniku* se dostavlja ***primljena poruka***, koja treba da bude što sličnija poslatoj poruci.



Slika 1.1. Osnovna blok šema telekomunikacionog sistema.

Osnovna blok šema telekomunikacionog sistema, prvi put predložena u radu [1], prikazana je na slici 1.1. Kao što je prethodno rečeno, poruke koje emituje izvor (označene sa m) u predajniku se utiskuju u signal $x(t)$, koji je uvek funkcija vremena, a koji obično ima električnu prirodu (napon ili struja). Signal se prenosi kroz kanal, koji nije „gostoljubiva“ sredina jer slabi i izobličava poslati signal a u njemu se javljaju i smetnje $n(t)$. U takvim uslovima, izazov je konstruisati prijemnik koji iz primljenog signala $y(t)$ pouzdano rekonstruiše poruke $\hat{m}$, tako da one budu identične poslatim porukama (ili da se neznatno razlikuju od njih). U nastavku će biti pokazano, na dva karakteristična primera, da se praktično svaki telekomunikacioni sistem može opisati prethodnom blok šemom.

Primer 1.1.

Na slici 1.2 prikazan je, na krajnje pojednostavljen način, princip rada fiksne telefonije. Ovaj sistem je projektovan za prenos govora, pa je poruka koju treba preneti sadržana u zvuku koji nastaje vibriranjem glasnih žica. Mikrofon u telefonskoj slušalici zvuk pretvara u električni signal, koji se dalje prenosi kroz upredenu bakarnu paricu i dolazi do slušalice drugog sagovornika. Zvučnik na slušalici obavlja transformaciju električnog signala u zvuk, čime se omogućava da korisnik primi poruke. Ukoliko sistem dobro radi, nesmetano će teći komunikacija između govornika.

Jasno je da se u ovom sistemu govor predstavlja električnim signalom, a predajnik i prijemnik se nalaze u telefonskom aparatu. U ovom slučaju kanal predstavlja bakarna parica, odnosno medijum kroz koji se prostire odgovarajući električni signal.



Slika 1.2. Ilustracija fiksnog telekomunikacionog sistema. □