

Ranko Vojinović ■ Vladica Avramović

ELEKTRONSKE KOMUNIKACIJE

udžbenik za prvi razred srednje stručne škole

Obrazovni program:

Elektrotehničar elektronskih komunikacija



Zavod za udžbenike i nastavna sredstva
PODGORICA, 2023.

Ranko Vojinović ■ Vladica Avramović

ELEKTRONSKE KOMUNIKACIJE

udžbenik za prvi razred srednje stručne škole

Izdavač: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica

Za izdavača: mr Aleksandra Hajduković, direktorica

Glavni urednik: Radule Novović

Odgovorni urednik: Lazo Leković

Urednica izdanja: Jadranka Đerković

Recenzenti:
dr Maja Delibašić
dr Branislav Čalasan
Dubravka Delić
Radovan Božović
Tatjana Jokić

Lektura i korektura: Dragan Batrićević

Fotografije: shutterstock.com, unsplash.com (william william, Jason Leung)

Grafička obrada: Nikola Knežević

Tehnička urednica: Dajana Vukčević

CIP – Каталогизација у публикацији
Национална библиотека Црне Горе, Цетиње

ISBN 978-86-303-2460-4
COBISS.CG-ID 27125764

Nacionalni savjet za obrazovanje, Rješenjem br. 01-019/23-6450/9 od 14. 08. 2023. godine, odobrio je ovaj udžbenik za upotrebu u srednjim stručnim školama.

Copyright © Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica, 2023.

Sadržaj

Predgovor	7
Uvodno poglavlje	8
I. Osnove trigonometrije	10
II. Logaritmi – definicija i osobine	15
III. Kompleksni brojevi	16
IV. Kola naizmjenične struje	18
V. Oscilatorna kola	22
VI. Operacioni pojačavači	23
1. Uvod u telekomunikacije	24
1.1. Istorijski razvoj telekomunikacija	26
1.1.1. Telegrafija	26
1.1.2. Telefonija	28
1.1.3. Radio-prenos	28
1.1.4. Televizijski prenos i prenos podataka	29
1.1.5. Satelitski prenos	30
1.1.6. Internet	31
1.1.7. Mobilna telefonija	33
1.2. Pravci razvoja u telekomunikacijama	34
1.2.1. Internet stvari (<i>Internet of Things – IoT</i>)	36
1.3. Model telekomunikacionog sistema	41
1.4. Povezivanje otvorenih sistema na principu OSI referentnog modela	45
1.4.1. Petoslojni TCP/IP referentni model	48
2. Poruke i signali	52
2.1. Vrste signala	54
2.1.1. Diskretni i kontinualni signali	54
2.1.2. Deterministički i slučajni signali	55
2.1.2.1. Značaj slučajnih i determinističkih signala	56
2.1.3. Periodični i aperiodični signali	57
2.1.4. Analogni i digitalni signali	60
2.2. Vremenske i frekvencijske karakteristike periodičnih i aperiodičnih signala	64
2.2.1. Vremenski oblik i spektar periodičnih i aperiodičnih signala	68
2.2.1.1. Vremenski oblik i spektar aperiodičnih signala	70
2.2.1.2. Vremenski oblik i spektar periodičnih signala	72
2.2.1.2.1. Spektar pravougaonog signala	75

3. Uticaj sistema na prenos signala 82

3.1. Sistemi za prenos signala	84
3.1.1. Karakteristike sistema za prenos signala	84
3.1.1.1. Funkcija prenosa	84
3.1.1.2. Amplitudska i fazna karakteristika	86
3.1.1.3. Propusni opseg	87
3.1.2. Linearni i nelinearni sistemi prenosa	90
3.1.2.1. Idealni i realni sistemi prenosa	93
3.1.3. Uzroci izobličenja signala	96
3.2. Šumovi	98
3.2.1. Termički šum.	99
3.2.2. Intermodulacioni šum	102
3.2.3. Šumovi preslušavanja	102
3.3. Filtri	104
3.3.1. Podjela filtara prema propusnom opsegu	106
3.3.2. Karakteristični parametri filtara	108
3.3.3. Pasivni filtri	110
3.3.3.1. Filtri propusnici niskih učestanosti	113
3.3.3.2. Filtri propusnici visokih učestanosti	116
3.3.3.3. Filtri propusnici opsega učestanosti	118
3.3.3.4. Filtri nepropusnici opsega učestanosti.	121
3.3.3.5. RC filtri	124
3.3.4. Aktivni filtri	126
3.3.4.1. Aktivni filtri – propusnici niskih učestanosti	126
3.3.4.2. Aktivni filtri – propusnici visokih učestanosti	127
3.3.4.3. Aktivni filtri – propusnici opsega učestanosti	128
3.3.4.4. Aktivni filtri – nepropusnici opsega učestanosti	128

4. Prenos signala 136

4.1. Principi različitih vrsta prenosa signala.	138
4.1.1. Analogni i digitalni sistemi prenosa.	138
4.1.1.1. Simpleks, poludupleks i puni dupleks prenos podataka	139
4.1.1.2. Serijski i paralelni prenos podataka	140
4.1.1.3. Sinhroni i asinhroni prenos	141
4.1.1.4. Unicast, broadcast i multicast prenos	143
4.1.1.5. Prenos u osnovnom opsegu i prenos sa modulisanim nosiocem.	143
4.2. Principi multipleksnog prenosa	145
4.2.1. Multipleksiranje sa frekvencijskom raspodjelom kanala (FDM)	146
4.2.1.1. Direktna i višestruka (predgrupna) modulacija.	148
4.2.2. Multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala (TDM).	153
4.2.3. Kodno multipleksiranje (CDM)	160

5. Medijumi za prenos signala	172
5.1. Vođeni medijumi.	174
5.1.1. Upredena parica.	174
5.1.2. Koaksijalni kabl.	179
5.1.3. Optičko vlakno	181
5.1.4. Uporedne karakteristike optičkih vlakana i bakarne žice	189
5.2. Bežični medijumi za prenos signala	191
5.2.1. Elektromagnetni talas	191
5.2.2. Elektromagnetni spektar.	193
5.2.3. Domet RF signala	196
5.2.4. Mehanizmi prostiranja EMT	198
5.2.4.1. Odbijanje (refleksija)	199
5.2.4.2. Prelamanje (refrakcija)	199
5.2.4.3. Upijanje (apsorpcija)	200
5.2.4.4. Difrakcija	200
5.2.4.5. Rasijanje (disperzija)	201
5.2.5. Snaga RF signala.	203
6. Lista engleskih skraćenica korišćenih u udžbeniku	216
7. Rječnik pojmova iz telekomunikacija.	219
8. Literatura	229
9. Korišćene internetske stranice	230

Predgovor

Poštovani učenice, poštovana učenice,

Udžbenik je podijeljen na poglavlja. Svako poglavlje sadrži **kratak uvod**, koji će te podstaći da razmišljaš o sadržajima koji slijede, i **osnovni tekst nastavne teme** – obavezan sadržaj koji treba da naučiš, i time postigneš ciljeve predviđene nastavnim planom i programom. Osnovni tekst prate odgovarajući **primjeri**, odnosno zadaci, koji pomažu razumijevanju sadržaja. Tekstovi koji nijesu obuhvaćeni Nastavnim programom, a koji će ti omogućiti da produbiš znanja iz ove oblasti, označeni su kao **Dodatak +**.

Važan dio udžbenika, koji je posebno označen kako ne bi opterećivao osnovni tekst, sadrži **zanimljivosti, primjenu naučenog i veze sa ostalim predmetima**. Cilj ovih elemenata jeste da te dodatno zainteresuju za sadržaj osnovne teme, da ti omoguće da saznaš kakve su praktične primjene izložene materije, te da pročitano povezuješ sa nastavnom materijom koju si izučavao/izučavala iz drugih predmeta.

U okviru svakog poglavlja objašnjeno je **značenje manje poznatih riječi** u kontekstu u kojem se javljaju. Na kraju svakog poglavlja dat je **rezime** sa preglednim i konciznim sadržajem poglavlja, kao i **pitanja za razmišljanje** sa zadacima. Rješenja zadataka označenih zvjezdicom data su u knjizi. Ukoliko si zainteresovan/zainteresovana da produbiš znanja iz nekog poglavlja, na njegovom kraju data je **preporuka za korišćenje dodatne literature** u kojoj je naveden naziv knjige ili veb-stranice gdje možeš naći materijal za dodatno izučavanje gradiva.

Na kraju udžbenika nalazi se **spisak skraćnica** na engleskom jeziku i prevodom na naš jezik, te **rječnik pojmova** koji na pregledan način prikazuje i definiše pojmove iz oblasti telekomunikacija koji su u udžbeniku sadržani, kao i **spisak literature i veb-stranica** korišćenih pri izradi udžbenika.

Telekomunikacije su jedna od temeljnih disciplina elektrotehnike i jedno od najznačajnijih ljudskih dostignuća. Bez korišćenja telekomunikacionih uređaja savremena civilizacija bila bi nezamisliva. Izučavanjem telekomunikacija razumjećeš kako ti uređaji funkcionišu i kako da ih primjenjuješ u svakodnevnom životu. Osim toga, pomoći će ti da razvijaš svijest o poštovanju pravila, da razvijaš osjećaj za važnost racionalnog trošenja materijalnih dobara i da jačaš ekološku svijest.

Autori



Uvodno poglavlje



Osnovni zadatak komunikacionog sistema jeste razmjena informacija između dva ili više subjekata. Subjekti u komunikaciji mogu biti čovjek i mašina. Da bi bili u komunikaciji, potrebno je da koriste isti jezik. Jezik komuniciranja može biti govor, jezik cifara, jezik pokreta itd. Razgovor dva čovjeka predstavlja komunikaciju ukoliko govore istim jezikom, odnosno – razumiju se.

Telekomunikacioni sistem omogućava prenos informacija na daljinu. Informacija se generiše u odgovarajućim sklopovima i pretvara se u oblik pogodan za prenos – pretvara se u signal. Telekomunikacioni sklopovi sačinjeni su od električnih kola, dok se signali mogu razmatrati kao funkcije vremena i učestanosti.

Otuda je za izučavanje, razumijevanje i analizu telekomunikacionih procesa neophodno poznavanje i odgovarajućeg matematičkog alata i osnova elektrotehnike. U školi ćeš detaljno izučavati matematiku i elektrotehniku. Međutim, da bi lakše pratio/pratila gradivo iz ovog udžbenika, u uvodnom poglavlju ukratko su izloženi osnovni pojmovi iz trigonometrije, logaritama i kompleksnih brojeva, bez kojih se ne mogu razumjeti osnovni principi elektronskih komunikacija. U uvodnom poglavlju izloženi su i osnovni pojmovi iz teorije električnih kola naizmjenične struje, kao i iz elektronike, koji su također neophodni za lakše usvajanje gradiva iz ovog udžbenika.

I. Osnove trigonometrije

Trigonometrijske funkcije su funkcije ugla. Uglovi se najčešće mjere u stepenima. Na primjer, prav ugao ima 90° , a pun 360° . Postoji još jedna jedinica za mjerenje ugla, a to je **radijan** [rad].

Radijan je ugao kod kojeg je dužina kružnog luka, koji je izgrađen nad tim uglom, jednaka poluprečniku kružnice.

Kada ugao mjerimo u radijanima, onda je veza između dužine kružnog luka s poluprečnika r i ugla α jednostavna:

$$\alpha = \frac{s}{r}.$$

Tako, na primjer, punom uglu (360°) odgovara dužina kružnog luka $s = 2\pi r$ (obim kružnice); izražen u radijanima, pun ugao iznosi 2π radijana. Prav ugao (90°) četvrtina je punog ugla, i iznosi $\pi/2$ radijana. Slično, uglovi od 60° , 45° , i 30° iznose, redom, $\pi/3$, $\pi/4$ i $\pi/6$ radijana.

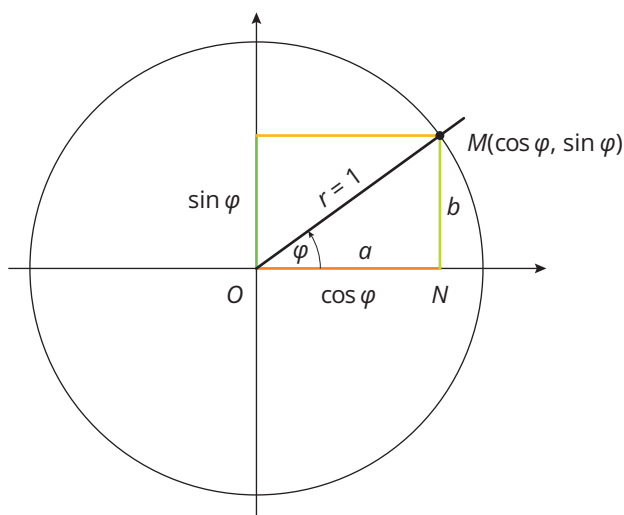
Iz relacije da 2π radijana iznosi 360° , dobija se veza između radijana i stepena:

$$1 \text{ rad} = \left(\frac{360}{2\pi}\right)^\circ,$$

odnosno između stepena i radijana:

$$1^\circ = \frac{2\pi}{360} \text{ radijana}.$$

Osnovne trigonometrijske funkcije jesu sinus, kosinus i tangens.



Slika 1. Trigonometrijska kružnica

Osnovne trigonometrijske funkcije obično se definišu na trigonometrijskoj kružnici. **Trigonometrijska kružnica** je kružnica sa centrom u koordinatnom početku i poluprečnikom jednakim jedinici (slika 1) u Dekartovom pravouglom koordinatnom sistemu xOy .

Ako je M tačka kružnice, a φ ugao između OM i x , onda se:

- x -koordinata tačke M naziva kosinus ugla φ , i označava sa $\cos \varphi$
- y -koordinata tačke M naziva sinus ugla φ , i označava sa $\sin \varphi$.

Odnos $\sin \varphi / \cos \varphi$ naziva se tangens ugla φ , i označava sa $\text{tg } \varphi$.

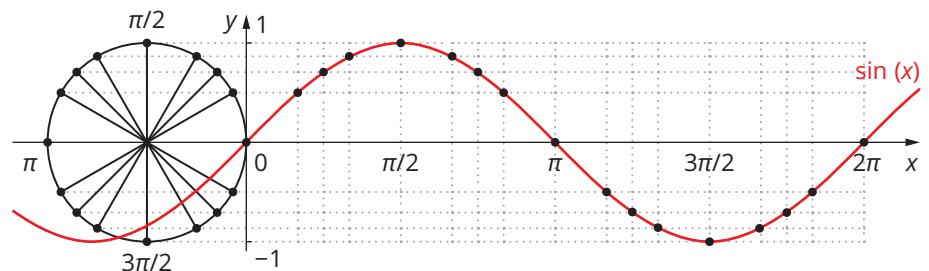
Sa slike 1 vidi se da trougao ONM predstavlja pravougli trougao čije su katete $a = \cos \varphi$ i $b = \sin \varphi$, a hipotenuza jednaka jedinici. Koristeći definicije sinusa, kosinusa i tangensa, može se zaključiti da je:

- sinus oštrog ugla u pravouglom trouglu jednak količniku naspramne katete i hipotenuze ($\sin \varphi = b/r$)
- kosinus oštrog ugla u pravouglom trouglu jednak količniku nalegale katete i hipotenuze ($\cos \varphi = a/r$)
- tangens oštrog ugla u pravouglom trouglu jednak količniku naspramne i nalegale katete ($\operatorname{tg} \varphi = b/a$).

Trigonometrijske funkcije imaju veliku primjenu u telekomunikacijama. Koristeći trigonometrijsku kružnicu, prikazaćemo kako izgleda grafik funkcije $y = \sin x$.

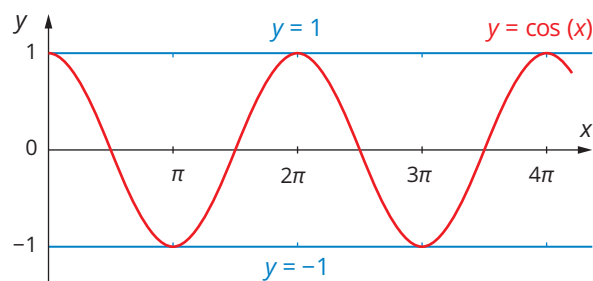
Apscisa tačke predstavlja njenu vrijednost na horizontalnoj osi x , a ordinata tačke predstavlja njenu vrijednost na vertikalnoj osi y .

Ako se tačka M kreće trigonometrijskom kružnicom u smjeru suprotnom kretanju kazaljke na satu, koristeći definiciju sinusne funkcije (da predstavlja ordinatu tačke M), onda je vrijednost ove ordinate za različite položaje tačke M , odnosno za različite vrijednosti ugla, prikazana na slici 2.



Slika 2. Predstavljanje grafika funkcije $y = \sin x$ pomoću trigonometrijske kružnice

Na sličan način može se dobiti i grafik funkcije $y = \cos x$. U ovom slučaju posmatrale bi se vrijednosti apscisa tačke M . Na slici 3 prikazan je grafik funkcije $y = \cos x$.



Slika 3. Grafik funkcije $y = \cos x$

Sa prethodne dvije slike može se uočiti da su vrijednosti funkcija sinus i kosinus ograničene, i da uzimaju vrijednosti od -1 do $+1$. Funkcije su periodične, i ponavljaju se za vrijeme od $T = 2\pi$, što predstavlja period ponavljanja funkcije ili periodu funkcije. Funkcije ne počinju u isto vrijeme da prave svoje periode, odnosno da se ponavljaju, već su njihovi grafici međusobno pomjereni za ugao od $\pi/2$ radijana.

Veličina $f = \frac{1}{T}$ naziva se **frekvencija** ili **učestanost**, i ona se izražava u hercima ($\text{Hz} = \frac{1}{\text{sec}}$). U telekomunikacijama se često koristi veličina $\omega = 2\pi f$,

koja se naziva **kružna frekvencija** (kružna učestanost). Frekvencija predstavlja brzinu promjene signala. Što je perioda signala manja, to je frekvencija signala veća, i obrnuto – što je perioda signala veća, to je frekvencija signala manja. Zato se kaže da perioda signala i frekvencija signala imaju recipročan odnos.

U telekomunikacijama se često koristi funkcija oblika $f(x) = A \sin(\omega x + \varphi)$. Veličina A predstavlja maksimalnu vrijednost, odnosno **amplitudu** funkcije $f(x)$, $\omega x + \varphi$ predstavlja fazu (ugao) funkcije, veličina ω je kružna frekvencija funkcije $f(x)$, dok veličina φ predstavlja trenutnu devijaciju faze (početnu fazu) funkcije $f(x)$.

Ugao trigonometrijskih funkcija može se zadati u stepenima ili radijanima ($360^\circ = 2\pi$ radijana). Perioda ima dimenziju vremena (sec). Perioda ponavljanja sinusne i kosinusne funkcije je 2π ili 360° .

NAPOMENA

π ima približnu vrijednost 3,14 ($2\pi \approx 6,28$).

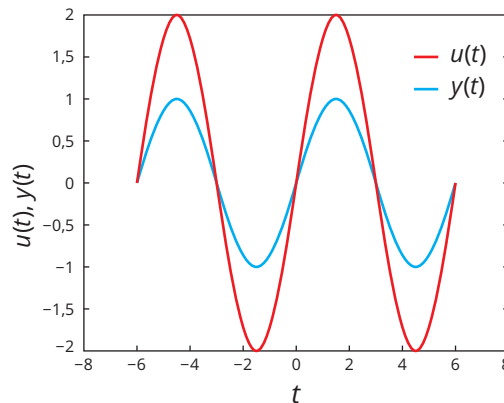
Primjer 1.

Nacrtaj sinusne signale oblika

- a) $y(t) = \sin t$
- b) $u(t) = 2 \sin t$.

Rješenje:

Navedeni signali imaju istu kružnu frekvenciju ($\omega = 1$) i trenutnu devijaciju faze ($\varphi = 0$), ali se razlikuju po amplitudi. Signal $u(t)$ ima dva puta veću amplitudu od signala $y(t)$. Na slici 4 prikazan je vremenski oblik tih signala za dvije periode ponavljanja:



Slika 4. Sinusne funkcije iste periode ponavljanja i različite maksimalne amplitude

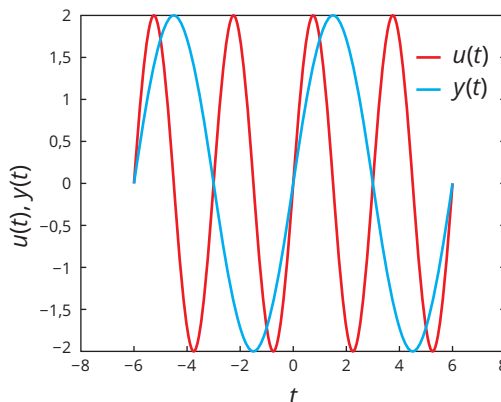
Primjer 2. Nacrtaj sinusne

signale oblika

a) $y(t) = \sin t$

b) $u(t) = \sin 2t$.

Rješenje: Navedeni signali imaju istu amplitudu ($U = 1$), ali se razlikuju po kružnoj frekvenciji. Signal $u(t)$ ima dva puta veću kružnu frekvenciju od signala $y(t)$. Na slici 5 prikazan je izgled tih signala:



Slika 5. Sinusne funkcije različite periode ponavljanja i iste maksimalne amplitude

Sa slike se može vidjeti da je signal $u(t)$ dva puta brži (puna linija), to jest on napravi dvije periode za vrijeme dok signal $y(t)$ napravi jednu periodu. To znači da prvi signal ima dva puta veću kružnu frekvenciju (brzinu ponavljanja periode) ili dva puta manju periodu ponavljanja. Drugi signal ima dva puta manju kružnu frekvenciju ili dva puta veću periodu ponavljanja.

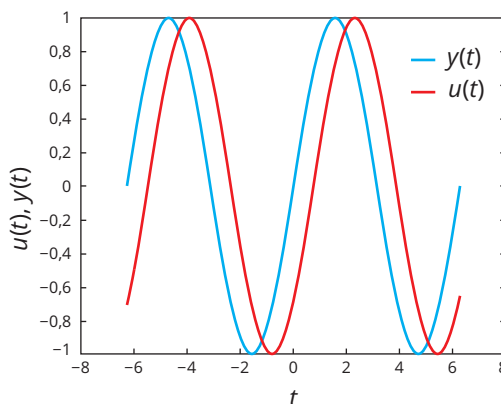
Primjer 3. Nacrtaj sinusne

signale oblika

a) $y(t) = \sin t$

b) $u(t) = \sin (t - \pi/4)$.

Rješenje: Navedeni signali imaju istu amplitudu i kružnu frekvenciju, ali se razlikuju po početnoj fazi. Signal $u(t)$ ima početnu fazu, pomjerenu udesno za $\pi/4$ u odnosu na signal $y(t)$. Na slici je prikazan vremenski oblik tih signala:



Slika 6. Sinusne funkcije iste periode ponavljanja, iste maksimalne amplitude i različite početne faze

Funkcija može biti pomjerena i ulijevo, ali je tada ugao funkcije $t + \pi/4$.

Tabela 1. Trigonometrijske vrijednosti nekih uglova izraženih u stepenim i radijanima

α°	0°	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
α [rad]	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{11\pi}{6}$	2π
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
$\operatorname{tg} \alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	-	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	-	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0

Prilog 1. Relacije između sinusnih i kosinusnih funkcija

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$$

U tabeli 1 prikazane su trigonometrijske vrijednosti nekih uglova izraženih u stepenim i radijanima.

U prilogu 1 prikazane su relacije između sinusnih i kosinusnih funkcija, koje se često primjenjuju u telekomunikacijama.

Ako je data trigonometrijska vrijednost ugla, onda se taj ugao može izračunati inverznom trigonometrijskom operacijom. Funkcije inverzne trigonometrijskim nazivaju se ciklometrijske ili arkus funkcije. Arkus sinus (arcsin), arkus kosinus (arccos) i arkus tangens (arctg) funkcije su inverzne funkcijama sinus, kosinus i tangens. Na primjer, ako je tangens ugla φ jednak α , tj. $\operatorname{tg} \varphi = \alpha$, onda je $\varphi = \operatorname{arctg} \alpha$.

II. Logaritmi – definicija i osobine

Proizvod brojeva, na primjer, $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$, možemo napisati u skraćenom obliku $2^4 = 16$. Kažemo da smo broj 2 stepenovali brojem 4. Broj 16 predstavlja vrijednost stepena, broj 2 osnovu stepena, a broj 4 predstavlja stepen, odnosno eksponent.

Ako su poznati osnovu i vrijednost stepena, a hoćemo da odredimo eksponent, onda se primjenjuje matematička operacija koja se naziva **logaritmovanje**:

$$4 = \log_2 16.$$

U ovom slučaju broj 2 predstavlja osnovu logaritma.

Prilog 2. Osnovna svojstva logaritama

1. $\log_a 1 = 0$
2. $\log_a a = 1$
3. $\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$
4. $\log_a \frac{x}{y} = \log_a x - \log_a y$
5. $\log_a x^n = n \log_a x$

Logaritam broja b za osnovu a jeste realan broj x kojim treba stepenovati osnovu a da bi se dobio pozitivan broj b ($a > 0$, $b > 0$, $b \neq 0$), ili $\log_a b = x \Leftrightarrow b = a^x$.

Osnovna svojstva logaritama prikazana su u prilogu 2.

U praksi se često koriste logaritmi sa osnovom 10, koji se nazivaju **dekadni logaritmi**. Pri pisanju dekadnih logaritama izostavlja se pisanje baze, pa je

$$\log x = \log_{10} x.$$

Primjer 4. Izračunaj bez pomoći kalkulatora:

- a) $\log 10$, $\log 100$, $\log 1000$
- b) $\log 1/10$, $\log 1/100$ i $\log 1/1000$.

Rješenje:

a) Iz definicije dekadnog logaritma lako se dobija da je

$$\log 10 = 1, \log 100 = 2 \text{ i } \log 1000 = 3, \text{ jer je}$$

$$10^1 = 10, 10^2 = 100 \text{ i } 10^3 = 1000.$$

b) Koristeći osobinu $\log x/y = \log x - \log y$ i prethodne rezultate, dobijamo da je

$$\log 1/10 = \log 1 - \log 10 = 0 - 1 = -1;$$

$$\log 1/100 = \log 1 - \log 100 = 0 - 2 = -2;$$

$$\log 1/1000 = \log 1 - \log 1000 = 0 - 3 = -3.$$

Zapažamo da su logaritmi brojeva većih od nule a manjih od jedinice – negativni. ■

III. Kompleksni brojevi

U skupu realnih brojeva ne postoji broj koji je rješenje kvadratne jednačine

$$x^2 + 1 = 0.$$

Rješenje ove kvadratne jednačine jeste imaginarna jedinica, koja se u matematici označava sa i , a u elektrotehnici, da bi se razlikovalo od oznake za struju, sa j :

$$x^2 = -1, x_{1,2} = \pm\sqrt{-1} = \pm j$$

Očigledno je da važi: $j^2 = -1$.

Broj $z = x + jy$ naziva se kompleksan broj. x predstavlja **realni dio** kompleksnog broja z i često se zapisuje kao $x = \text{Re}(z)$. y je **imaginarni dio** kompleksnog broja z i često se zapisuje kao $y = \text{Im}(z)$. Dva kompleksna broja $z = x + jy$ i $w = u + jv$ jednaka su ako su im jednaki realni i imaginarni dijelovi, tj. ako je $x = u$ i $y = v$. Kompleksni brojevi $-3 + 0j$, $5 - 0j$ jesu realni brojevi -3 , odnosno 5 . Brojevi $0 + j$, $0 - 5j$ jesu čisto imaginarni brojevi j i $-5j$.

Ako je $z = x + jy$, onda je $\bar{z} = x - jy$ njegov **konjugovano kompleksni broj**.

Osnovne operacije sa kompleksnim brojevima jesu sabiranje, oduzimanje, množenje i dijeljenje:

- Sabiranje/oduzimanje:

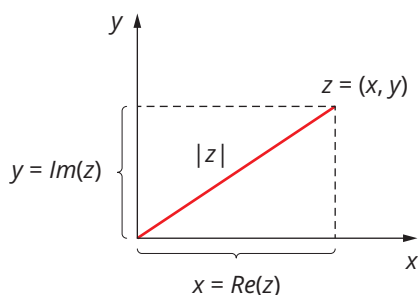
$$(a + jb) \pm (c + jd) = (a \pm c) + j(b \pm d)$$

- Množenje:

$$(a + jb) \cdot (c + jd) = ac + jbc + jad + j^2bd = (ac - bd) + j(bc + ad)$$

- Dijeljenje:

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{a + jb}{c + jd} \cdot \frac{c - jd}{c - jd} = \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 + d^2}, \text{ za } c^2 + d^2 \neq 0$$



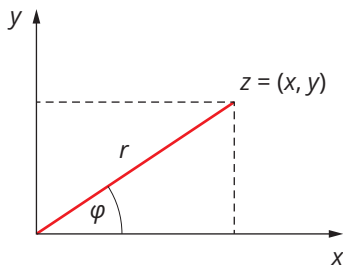
Slika 7. Grafičko prikazivanje kompleksnog broja

Kompleksan broj može se prikazati grafički (slika 7).

Realni dio kompleksnog broja nanosi se na x-osu a imaginarni dio kompleksnog broja na y-osu. Zato se svaki kompleksni broj može prikazati uređenim parom $z = (x, y)$.

Rastojanje tačke z od koordinatnog početka naziva se **moduo kompleksnog broja** i označava sa $|z|$. Moduo kompleksnog broja računa se primjenom Pitagorine teoreme:

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2}.$$



Slika 8. Predstavljanje kompleksnog broja u funkciji ugla

Ako kompleksni broj predstavimo u funkciji ugla φ , kao na slici 8, onda važi:

$$x = r \cos \varphi = \operatorname{Re}(z)$$

$$y = r \sin \varphi = \operatorname{Im}(z).$$

U ovom slučaju kaže se da je kompleksni broj $z = r \cos \varphi + jr \sin \varphi$ predstavljen polarnim koordinatama. Vrijednost $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ predstavlja apsolutnu vrijednost ili **moduo kompleksnog broja**, a ugao $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ **argument kompleksnog broja**.

Kompleksni broj može se zapisati i u eksponencijalnom obliku (Ojlerov obrazac):

$$z = r e^{j\varphi}.$$

Kombinovanjem Ojlerovog obrasca i zapisa kompleksnog broja u polarnim koordinatama, dobijamo da je:

$$z = r e^{j\varphi} = r \cos \varphi + jr \sin \varphi,$$

odakle slijedi da je:

$$j = e^{j\frac{\pi}{2}}.$$

Ovakav način zapisivanja kompleksnog broja ima veliku važnost u elektrotehnici. U ovoj interpretaciji, imaginarna jedinica j (tačka sa koordinatama $(0, 1)$), predstavlja jediničnu amplitudu sa fazom $\frac{\pi}{2}$, pa se j može zapisati u eksponencijalnom obliku i u polarnim koordinatama:

$$j = 1 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} = 0 + j = j.$$

Ako neki broj x , koji predstavlja realni dio kompleksnog broja, koji se nalazi na x -osi, pomnožimo sa j , onda će se on naći na y -osi, na koju se nanosi imaginarni dio kompleksnog broja, što znači da će se vrijednost x zarotirati za 90° , odnosno za $\frac{\pi}{2}$ radijana.

U elektrotehnici, množenje neke električne veličine sa j znači njeno fazno pomjeranje za $\frac{\pi}{2}$.

IV. Kola naizmjenične struje

Jedno od fundamentalnih svojstava materije jeste da čestice koje je sačinjavaju imaju naelektrisanje. Naelektrisanja se ne uništavaju i ne stvaraju, već se samo pomjeraju sa jednog mjesta na drugo, pri čemu njihova ukupna količina ostaje ista. Zakon održanja naelektrisanja (da je ukupna količina naelektrisanja u sistemu konstantna) jedan je od osnovnih zakona prirode. Naelektrisanje tijela opisuje se fizičkom veličinom koja se naziva količina naelektrisanja. Označava se sa q , a jedinica joj je kulon (C).

Prostor oko naelektrisanog tijela u kome se zapaža dejstvo električnih sila, naziva se električno polje. Naelektrisanje uneseno u električno polje posjeduje izvjesnu potencijalnu energiju. Količnik te energije i količine naelektrisanja naziva se električni potencijal. Jedinica za potencijal je volt (V). Razlika potencijala predstavlja napon, koji se takođe izražava u voltima.

Važnu veličinu u elektrotehnici predstavlja kapacitet. Kapacitet usamljenog provodnika brojno je jednak količniku količine naelektrisanja provodnika i njegovog potencijala. Jedinica za kapacitet naziva se farad (F), $1 \text{ F} = 1 \text{ C}/1 \text{ V}$.

Električna struja je usmjereno kretanje slobodnih elektrona kroz provodnik. Da bi električna struja tekla, mora postojati zatvoreno strujno kolo, i u kolu mora postojati izvor električne struje. Ako je količina naelektrisanja koja protiče kroz provodnik u jedinici vremena konstantna, onda se radi o stalnoj struji. Najčešći oblik stalne struje jeste jednosmjerna stalna struja, koja uvijek teče u jednom smjeru. Naizmjenična je električna struja koja periodično mijenja smjer i jačinu.

Oko svakog magneta postoji magnetno polje. Ono postoji i oko provodnika kroz koji teče struja. Za grafičko prikazivanje magnetnog polja koriste se linije magnetnog polja. Linije magnetnog polja su zatvorene krive linije. Broj magnetnih linija kroz neku površinu predstavlja magnetni fluks. On se izražava u veberima (Wb). Najvažnija veličina koja opisuje magnetno polje jeste **vektor** indukcije magnetnog polja. Jedinica za magnetnu indukciju je **tesla** (T).

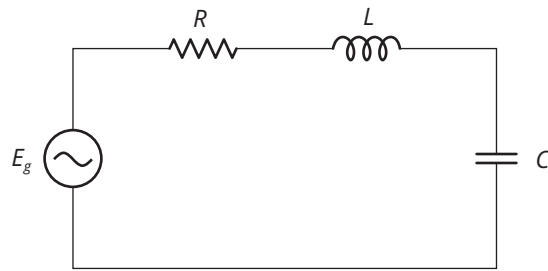
Prema Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije, promjena magnetnog fluksa kroz neki provodnik, izaziva u provodniku pojavu električne struje. Magnetni fluks koji potiče od magnetnog polja srazmjernan je trenutnoj vrijednosti jačine struje u provodniku. Koeficijent srazmjernosti fluksa i jačine struje L naziva se **induktivnost**. Jedinica za induktivnost je henri (H), $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb}/1 \text{ A}$.

Električni otpor je veličina kojom se mjeri stepen suprotstavljanja nekog provodnika prolasku električne struje. Jedinica za mjerenje otpora je **ohm**, i ona se označava grčkim slovom omega (Ω). Otpornik je element električnog kola čija je osnovna karakteristika električna otpornost.

U elektrotehnici se često koriste kalemovi. Kalem je izolovani provodnik koji se sastoji od većeg broja namotaja. Induktivnost je glavna karakteristika kalema.

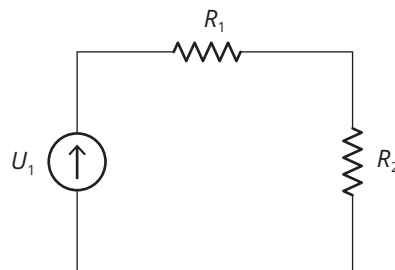
Kondenzator je sistem od dva provodnika na malom rastojanju, naelektrisan na istom količinom naelektrisanja, ali suprotnog znaka. Glavna karakteristika kondenzatora jeste kapacitivnost.

Prosto strujno kolo naizmjenične struje dobija se rednim povezivanjem naizmjeničnog izvora napona (E_g) i potrošača. Potrošači mogu biti otpornici (oznaka R), kalemovi (oznaka L) i kondenzatori (oznaka C). Na slici 9 dato je prosto strujno kolo sa naizmjeničnim izvorom, otpornikom (R), kalemom (L) i kondenzatorom (C) u serijskoj ili rednoj vezi.



Slika 9. Prosto kolo naizmjenične struje

U kolima jednosmjerne struje, struja zavisi, za određenu vrijednost elektromotorne sile (EMS), samo od otpornosti (R) kola. Po Omovom zakonu, jačina struje u kolu obrnuto je proporcionalna otporu u kolu, odnosno važi da je: $I = U/R$. Na slici 10 prikazano je prosto kolo jednosmjerne struje sa jednosmjernim izvorom (U_1) u serijskoj vezi sa dva otpornika (R_1 i R_2).



Slika 10. Prosto kolo jednosmjerne struje

Ako u kolo jednosmjerne struje priključimo kondenzator, struja u kolu će postojati veoma kratko vrijeme pri punjenju ili pražnjenju kondenzatora, pa se kondenzator u kolu jednosmjerne struje može smatrati kao prekid. Ako u kolo jednosmjerne struje priključimo kalem, onda se u njemu neće indukovati nikakav napon koji se suprotstavlja struji u kolu, jer se elektromagnetna indukcija javlja samo pri promjeni fluksa, odnosno promjeni struje koja izaziva taj fluks. Zbog toga kalem predstavlja običan provodnik u kolu jednosmjerne struje, odnosno kažemo da je kalem u kolu jednosmjerne struje – kratak spoj.

U kolu jednosmjerne struje, kondenzator se ponaša kao prekid a kalem kao kratak spoj.

Ako se kondenzator priključi u kolo naizmjenične struje, on će se u toku jedne periode ponašati čas kao prijemnik (uzima energiju kada napon raste – kondenzator se puni) a čas kao izvor (vraća energiju kada dovedeni napon opada – kondenzator se prazni). Naizmjenična struja periodično, u ritmu svoje frekvencije, puni i prazni kondenzator. Što su brzine promjene struje veće, odnosno što je veća frekvencija naizmjenične struje, sporije će se odvijati punjenje i pražnjenje kondenzatora, tj. biće manja kapacitivna otpornost kondenzatora.

Za naizmjeničnu struju kondenzator predstavlja otpornost koja se naziva **kapacitivna otpornost**.

Kapacitivna otpornost (X_C) obrnuto je srazmjerna proizvodu kapacitivnosti kondenzatora (C) i kružne učestanosti naizmjenične struje (ω):

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Nastanak i nestanak napona između ploča kondenzatora posljedica je električne struje. Struja prethodi naponu. Mjerenjima je utvrđeno da je kašnjenje promjene jačine napona u odnosu na promjenu struje za četvrtinu perioda ($\frac{T}{4}$) jedne pune oscilacije struje ili za ugao od $\frac{\pi}{2}$ radijana. U kolu naizmjenične struje koje sadrži samo kapacitivnu otpornost, struja fazno prednjači naponu za $\frac{\pi}{2}$ radijana.

Ako se kalem priključi u kolo naizmjenične struje, onda se u njemu pri svakoj promjeni fluksa, odnosno promjeni struje kao uzroka pojave fluksa, indukuje *EMS* koja se suprotstavlja promjeni struje. Dakle, i kalem u kolu naizmjenične struje predstavlja neku posebnu otpornost, koja se naziva **induktivna otpornost**. Što su brzine promjene struje veće, odnosno što je veća frekvencija naizmjenične struje, veća će biti i induktivna otpornost kalema.

Induktivna otpornost kalema (X_L) srazmjerna je proizvodu kružne učestanosti naizmjenične struje (ω) i koeficijenta samoindukcije (L):

$$X_L = \omega L.$$

Usljed djelovanja *EMS* samoindukcije struja se ne mijenja istovremeno s naponom. Promjene struje zaostaju za promjenama napona. Mjerenjima je utvrđeno da je kašnjenje promjene jačine struje u odnosu na promjenu

napona za četvrtinu perioda ($\frac{T}{4}$) jedne pune oscilacije napona ili za ugao od $\frac{\pi}{2}$ radijana.

U kolu naizmjenične struje koje sadrži samo induktivnu otpornost, struja u kalemu fazno kasni za naponom koji je uzrokovao tu struju, za $\frac{\pi}{2}$ radijana.

U kolu naizmjenične struje koje sadrži samo aktivni otpor (R), struja u otporniku je u fazi sa naponom koji je uzrokovao tu struju.

Za razliku od aktivne otpornosti, kod koje se energija izvora uglavnom pretvara u toplotu, kod kapacitivne i induktivne otpornosti energija izvora transformiše se u energiju elektrostatičkog polja kondenzatora ili magnetnu energiju kalema. Zbog toga kapacitivna i induktivna otpornost predstavljaju **reaktivne otpornosti** ili **reaktanse** električnog kola.

Veličina $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ naziva se **impedansa**, i ona predstavlja ukupnu otpornost kola naizmjenične struje.

Zbog razlika u fazama između strujnih veličina, u kolima naizmjenične struje Omov zakon ne važi u trenutnom obliku. Stoga bi analiza složenijih kola naizmjenične struje preko trenutnih vrijednosti predstavljala težak posao. Te teškoće riješene su kompleksnim predstavljanjem električnih veličina. Na ovaj način, komplikovane operacije, koje zahtijevaju primjenu više matematike, svode se na rješavanje algebarskih jednačina sa kompleksnim brojevima.

Ako u linearnom električnom kolu (kolu sa konstantnim parametrima R , L i C) svi izvori imaju istu učestanost, tada i naponi na krajevima pojedinih elemenata kola, i struje u njima, imaju istu učestanost. Fazne razlike između pojedinih naizmjeničnih veličina su konstantne, pa ako se za cijelo kolo usvoji isti početni trenutak, fazne razlike ostaju jednake razlikama početnih faza odgovarajućih veličina (napona, struja). Iz oblika za trenutnu vrijednost neke električne veličine može se naći njen kompleksni predstavnik, za što je neophodno poznavati efektivnu vrijednost te veličine i njenu početnu fazu. Efektivna vrijednost neke naizmjenične veličine sinusnog oblika dobija se tako što se maksimalna vrijednost te iste veličine podijeli sa $\sqrt{2}$. Ako se radi o naponu, onda vrijedi da je

$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

gdje je U_{ef} efektivna vrijednost napona a U_m maksimalna vrijednost napona. Efektivna vrijednost napona gradske mreže kod nas je $U_{ef} = 220$ V.

Kompleksni predstavnici električnih veličina označavaju se crticom ispod njene oznake; na primjer, napon i struja u kompleksnom obliku predstavljaju se simbolima \underline{U} i \underline{I} .

Ako na krajevima kola za naizmjeničnu struju djeluje napon $\underline{U} = Ue^{j\theta}$, i kroz njega teče struja $\underline{I} = Ie^{j\psi}$, onda je

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\theta-\psi)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi}.$$

Veličina \underline{Z} , koja je jednaka odnosu kompleksnog napona na krajevima kola i kompleksne struje u kolu, naziva se **kompleksna impedansa kola**.

Ako kolo naizmjenične struje sadrži samo kapacitivnu otpornost, struja prednjači naponu, odnosno $\theta < \psi$, ($\varphi < 0$), te je:

$$\underline{U} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I} = \frac{1}{j\omega C} \underline{I}.$$

Ako kolo naizmjenične struje sadrži samo induktivnu otpornost, struja kasni za naponom, odnosno $\theta > \psi$, ($\varphi > 0$), te je:

$$\underline{U} = j\omega L \underline{I}.$$

Ako kolo naizmjenične struje sadrži elemente R , L i C , onda važi:

$$\underline{U} = \left(R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right) \underline{I} = \underline{Z} \underline{I},$$

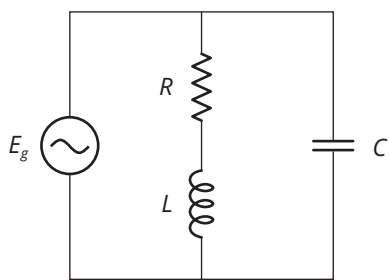
što predstavlja Ohmov zakon u kompleksnom obliku. Kompleksna impedansa kola ima vrijednost

$$\underline{Z} = R + j \left(j\omega L - \frac{1}{\omega C} \right).$$

V. Oscilatorna kola

Ako se kalem i kondenzator povežu redno ili paralelno u kolo naizmjenične struje, dobija se električno kolo koje se naziva **oscilatorno kolo**. Učestanost na kojoj su reaktanse kalema i kondenzatora međusobno jednake naziva se **rezonantna učestanost**, i ona je

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Tomsonov obrazac).}$$

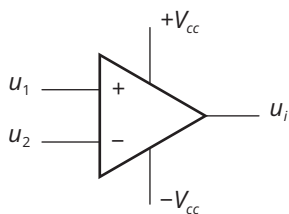


Slika 11. Oscilatorno RLC kolo

Na rezonantnoj učestanosti, signali se propuštaju sa veoma malim slabljenjem. Ova osobina određuje ulogu oscilatornih kola u telekomunikacijama. Pomoću njih se realizuju elektronski sklopovi koji omogućuju ostvarivanje važne uloge u radio-prijemnicima, kao što je **selektivnost** (propuštanje signala samo određene učestanosti) i kao što su filtri propusnici ili nepropusnici opsega učestanosti, koji takođe imaju veliku važnost u telekomunikacijama. Pomoću oscilatornih kola realizuju se elektronski sklopovi koji ostvaruju važne uloge u radio-prijemnicima. Na slici 11 prikazano je oscilatorno kolo RLC sa naizmjeničnim izvorom E_g .

VI. Operacioni pojačavači

Operacioni pojačavači izrađuju se od tranzistora, aktivnih elektronskih elemenata koji pojačavaju električni signal koji im se dovede na ulaz. Pojačanje se vrši na račun baterije kojom se tranzistori napajaju.



Slika 12. Operacioni pojačavač

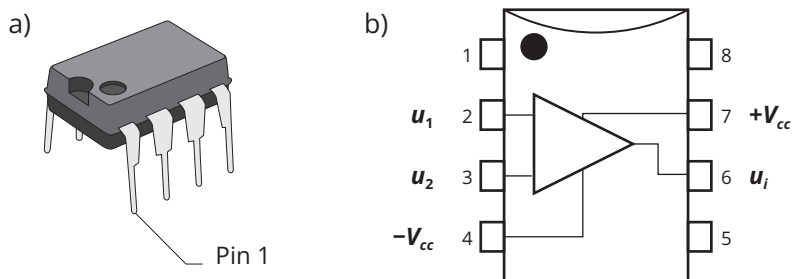
Operacioni pojačavači su električna kola koja imaju veliko pojačanje (reda veličine 10^6), veoma visoku ulaznu otpornost i malu izlaznu otpornost. Operacioni pojačavači označavaju se simbolom prikazanim na slici 12.

Izlazni napon operacionog pojačavača proporcionalan je razlici ulaznih napona, odnosno važi da je:

$$u_i = A(u_1 - u_2),$$

gdje je A naponsko pojačanje. Naponi $+V_{cc}$ i $-V_{cc}$ predstavljaju napone napajanja operacionog pojačavača, i oni se obično izostavljaju na šemama. Ulaz u operacioni pojačavač sa znakom „+“ predstavlja neinvertujući, a ulaz sa znakom „-“ invertujući ulaz operacionog pojačavača. Ove oznake znače da je izlazni napon u fazi sa naponom na neinvertujućem ulazu, dok je fazno pomjeren za π u odnosu na napon na invertujućem ulazu.

Takvi pojačavači realizuju se u integrisanoj tehnici. Izgled integrisanog kola prikazan je na slici 13a, dok su mu je unutrašnja struktura i funkcije pojedinih nožica (pinovi) prikazani na slici 13b.



Slika 13. Integrisano kolo operacionog pojačavača 741



1. Uvod u telekomunikacije

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- definišeš pojmove *telekomunikacija i telekomunikacioni sistem*
- opišeš razvoj telekomunikacija kroz istoriju
- prikažeš pravce razvoja u telekomunikacijama: od komunikacija čovjek – čovjek, preko komunikacija čovjek – mašina, do komunikacija mašina – mašina i koncepta internet-stvari (IoT)
- uporediš opšti i detaljniji model telekomunikacionog sistema
- objasniš ulogu elemenata telekomunikacionog sistema: izvor informacija, predajnik, prenosni medijum, prijemnik i korisnik
- objasniš povezivanje otvorenih sistema na principu OSI referentnog modela.



Riječ telekomunikacije potiče od grčke riječi *tele* (daleko) i latinske riječi *communicare*, koja znači „razmijeniti nešto“. Dakle, telekomunikacije označavaju razmjenu na daljinu.

Danas se pod telekomunikacijama podrazumijeva svako emitovanje, prenos ili prijem poruka na daljinu u obliku signala (od izvora informacija do korisnika), korišćenjem žičnih, radio, optičkih ili drugih elektromagnetnih sistema.

Poruke su sve ono što se u telekomunikacijama prenosi, a informacija koja se prenosi sadržana je u poruci. Signal predstavlja električni, elektromagnetni ili svjetlosni ekvivalent poruke koja se prenosi. Osnovni zadatak telekomunikacionog sistema jeste da se poruka u vidu signala prenese na udaljeno mjesto, a da pri tome primljeni signal što je moguće više odgovara poslatom signalu.

Osnovu koncepta telekomunikacija čine različite vrste telekomunikacionih usluga (servisa) koje telekomunikacioni operatori – pružaoci usluga, pružaju krajnjim korisnicima. Pomoću tih usluga moguć je pristup govornim servisima, računarskim podacima, audio i video zapisima i drugim multimedijalnim sadržajem; moguća je i njihova razmjena.

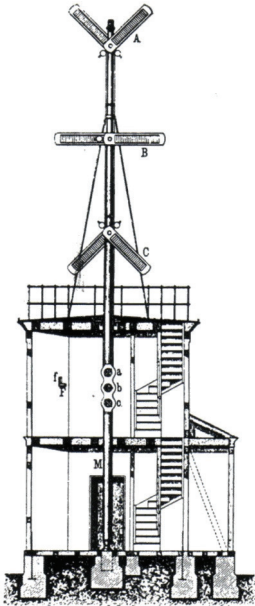
Telekomunikacioni mrežni sistem čini skup telekomunikacionih mreža: fiksna mreža (telefonska, prenos podataka, internet), mobilna mreža,

satelitska mreža, difuzna mreža (radio i televizija) i kablovska TV mreža. Prema tipu servisa, telekomunikacione mreže mogu biti: telefonske (fiksne i mobilne mreže za prenos govora), mreže za prenos podataka (lokalne, gradske i globalne), difuzne TV mreže (mreže za difuziju audio i video signala – radio-difuzne i kablovske mreže) i integrisane mreže (mreže sa integrisanim servisima – govor, slika i podaci). Razvoj telekomunikacionih mreža kreće se u pravcu stvaranja jedinstvene multiservisne platforme za pružanje svih vrsta servisa: prenos govora, podataka, pokretnih i nepokretnih slika, prenos multimedijalnih servisa i slično. Integracija svih servisa, zasnovana je na internet-protokolu – IP.

Internet je danas najvažniji oblik komunikacionih tehnologija. Veliki broj ljudi u svijetu koristi telefoniju, fiksnu i mobilnu. Procjena je da mobilnu telefoniju koristi oko pet milijardi ljudi, što predstavlja 2/3 od ukupnog broja stanovnika na Zemlji. Bez sistema globalnog pozicioniranja (GPS), čija je namjena da pomoću satelita i radio-signala određuje pozicije objekata na zemlji, danas je praktično nezamislivo upravljanje brodovima, avionima, pa i vozilima. Video-konferencijske veze, kojima se ostvaruju video i govorne komunikacije, primjenjuju se tokom organizacije sastanaka osoba koje se obično nalaze na udaljenim mjestima. Daljinsko upravljanje različitim uređajima, takođe omogućuju telekomunikacioni servisi.

1.1. Istorijski razvoj telekomunikacija

Ljudi su oduvijek iskazivali potrebu za komunikacijom na daljinu i međusobnu razmjenu informacija: riječima, simbolima, crtežima, pismom, dimnim signalima, golubovima pismonošama, glasnicima, kuririma na konjima i slično. Riječi, simboli i slova definisali su neku poruku, koju su ljudi mogli da prepoznaju čulom sluha ili čulom vida, verbalno ili vizuelno.



Slika 1.1. Optički telegrafski toranj

1.1.1. Telegrafija

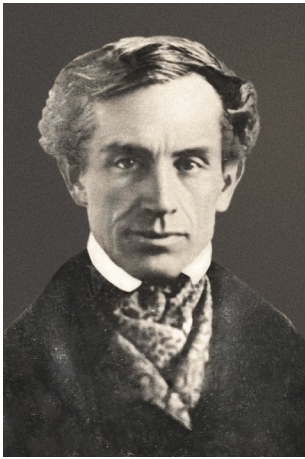
Telegrafija je tehnika za prenos tekstualnih poruka na daljinu, kao što su telegrami, pomoću signalnih kodova.

Prvi telegrafi su koristili optički prenos poruka. Sistem se sastojao od niza tornjeva, sa pokretnim elementima kojima su upravljale ljudske posade. Svaka pozicija pokretnih elemenata odgovarala je jednom slovu. Tornjevi su postavljeni na uzvišenjima međusobne udaljenosti 400 m kako bi se iz svakog tornja vidio sljedeći u nizu. On bi prenosio istu poruku na sljedeći toranj, i tako redom. Za bežičnu komunikaciju na kratkim rastojanjima koristio se jak reflektor, koji se naizmjenično palio i gasio. Uključivanjem i isključivanjem reflektora generisao se skup svjetlosnih signala koji su predstavljali odgovarajuće poruke.

Na slici 1.1 prikazan je prvi optički telegrafski toranj.

U Francuskoj je u XVIII vijeku postojao niz optičkih telegrafa, ukupno 534 na dužini od 5000 km. Problem prvih telegrafa bio je taj što se nijesu mogli koristiti tokom noći i po lošem vremenu.

Smatra se da razvoj elektronskih telekomunikacija počinje 1844. godine, kada je Semjuel Morze ostvario prvu telegrafsku vezu. Tada je ostvaren prenos signala Morzeovom azbukom između američkih gradova Vašingtona i Baltimora. Zahvaljujući ovom pronalasku, mogle su se razmjenjivati informacije električnim impulsima preko bakarnih žica. Naime, Morzeova azbuka predstavlja niz dugačkih ili kratkih električnih impulsa (nizovi crtica i tačaka), pa je poruke moguće prevoditi u ove nizove i slati žicama. Tačka se prenosi kratkim, a crtica tri puta dužim trajanjem, pomoću određenih tipki. Svaki znak (slovo ili broj) ima svoju kombinaciju tačaka i crtica. Uređaj koji šalje poruke sastoji se od tipke i baterije. Tipka služi za puštanje iz baterije strujnog impulsa koji odgovara znaku koji se šalje. Poruka sastavljena od znakova šalje se električnim putem u obliku električnih impulsa putem žičanog provodnika – upredenom bakarnom paricom (parovi izolovanih bakarnih žica koje su upredene jedna oko druge, što će biti objašnjeno u petom poglavlju knjige). S obje strane žice nalazio se po jedan uređaj, od kojih jedan služio za slanje a drugi za primanje poruka. Na prijemnom uređaju, niz tačaka i crtica registrovao se uz pomoć papirne trake, na koju su se zapisivali primljeni simboli.



Semjuel Morze (1791–1872), američki pronalazač i slikar. Čuven je po izumu telegrafa i Morzeove azbuke.

Na slici 1.2 prikazana je Morzeova tabela kodova za slova engleskog alfabeta i cifre od 0 do 9.

A · –	J · – – –	S ...	1 · – – – –
B – – –	K – –	T –	2 · – – – –
C – – – ·	L · – – ·	U · – –	3 · – – –
D – – ·	M – –	V · – – –	4 · – – –
E ·	N – ·	W · – –	5 · – – –
F · – – ·	O – – –	X – – – –	6 – – – –
G – – ·	P · – – ·	Y – – – –	7 – – – ·
H · – – ·	Q – – · –	Z – – – ·	8 – – – ·
I · ·	R · – ·	0 – – – – –	9 – – – – ·

Slika 1.2. Morzeova tabela kodova

Do 1866. godine postavljena je telegrafska linija preko Atlantskog okeana, čime je Amerika bila povezana sa Evropom žičnim putem. Do 1940. godine preko Atlantika je bilo oko 40 takvih linija. Godine 1861. američki Vestern union (Western Union) postavio je prvu interkontinentalnu telegrafsku liniju, čime je postao prva telegrafska kompanija u svijetu. Na slici 1.3. prikazan je prvi Morzeov telegraf.

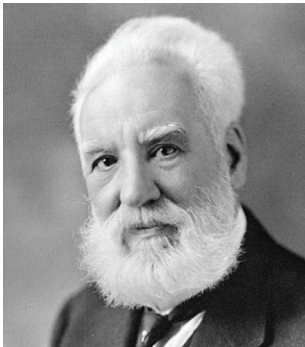
ZANIMLJIVOST

Najpoznatija skraćenica u Morzeovoj azbuci jeste SOS. Šalju je posade brodova u slučaju opasnosti. Iako se često tumači kao skraćenica od poruke *Save Our Souls* (engleski: *Spasite naše duše*), oznaka potiče od jednostavnosti Morzeovih znakova koji odgovaraju ovoj poruci: tri kratka – tri duga – tri kratka signala · · · – – – · · ·.



Slika 1.3. Prvi Morzeov telegraf

Telegrafski uređaji pomoću kojih se na prijemnoj stanici piše brza poruka (telegram), običnim slovima direktno na papir, nazivaju se teleprinteri.

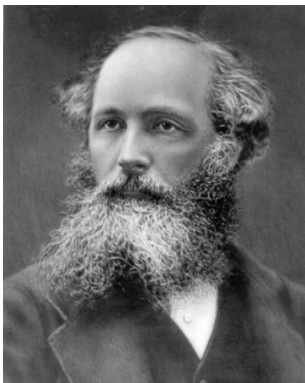


Aleksandar Graham Bel

(1847–1922), američki naučnik, pronalazač i osnivač telefonske kompanije. Poznat je po pronalasku telefona.

ZANIMLJIVOST

Prva poruka izgovorena posredstvom telefonske veze bile su riječi Aleksandra Bela svom asistentu, Votsonu: „Gospodine Votsone, dođite ovamo, želim da vas vidim“.



Džejms Maksvel (1831–1879), škotski fizičar i matematičar. Dao je matematičko objašnjenje elektromagnetizma pomoću jednačina koje su po njemu nazvane Maksvelove jednačine. One su po važnosti ravne Njutnovim jednačinama klasične mehanike.

1.1.2. Telefonija

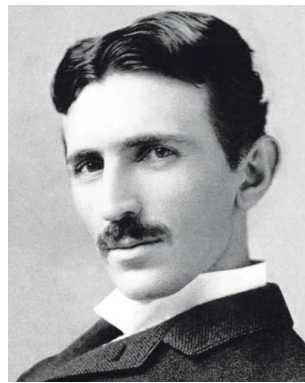
Prenos govora (telefonija), čiji je osnivač pronalazač telefona Graham Bel, ostvaruje se 1876. godine. Prvim telefonskim aparatom, koji je imao istu napravu za govor i slušanje, moglo se razgovarati samo na udaljenosti od nekoliko stotina metara. Telefonima su kasnije dodati mikrofoni i slušalice. U mikrofoni se govor (zvučni talasi) pretvara u električni signal, a slušalice ima obrnutu ulogu – da pretvori električni signal u govor. Za ljude toga vremena, koji su se uživo mogli čuti samo na kratkim rastojanjima, ovo je izgledalo nestvarno.

Prve telefonske veze – koje su zahtijevale povezivanje dva telefona parom žica, bez ikakvih uređaja za signalizaciju koji bi osobu na drugom kraju obavijestili o pozivu – usavršavale su se pronalaskom i unapređenjem telefonskih centrala. Naime, u početku su se telefonima ostvarivale komunikacije posredovanjem, gdje su zaposleni ručno prespajali veze između korisnika. Kasnije su se razvile automatske telefonske centrale.

Godine 1956. godine položen je na dnu Atlantskog okeana, između Amerike i Engleske, prvi telefonski podmorski kabl.

1.1.3. Radio-prenos

Osnovni nedostatak žičnih komunikacija jeste ograničena mobilnost korisnika. Krajem 19. vijeka fizičari Džejms Maksvel i Henrik Herc dolaze do novih otkrića u oblasti elektromagnetike, na kojima se zasnivaju radio-komunikacije. To je komunikacija ostvarena pomoću radio-talasa. Riječ je o elektromagnetnim talasima koji se prenose kroz slobodan prostor bežičnim putem, brzinom svjetlosti. Njihove učestanosti nalaze se u opsegu od 9 kHz do 3000 GHz. Ruski fizičar Aleksandar Popov demonstrira 1896. funkcionisanje radio-veze, otvarajući put bežičnom prenosu informacija. Nikola Tesla 1896. patentira radio-prenos, a Đuljelmo Markoni 1897. ostvaruje prvu radio-vezu na rastojanju od jednog kilometra. Godine 1899. realizovana je radio-komunikacija između Engleske i Francuske, a 1901. prva transatlantska radio-komunikacija. Od tog vremena radio-komunikacije se razvijaju u dva pravca: prenos poruka na velika rastojanja u oba smjera između dva korisnika (pomoću usmjerenih



Nikola Tesla (1856–1943), slavni pronalazač i naučnik srpskog porijekla. Bez njegovih otkrića iz elektrotehnike (naizmjenične struje, električne mašine) i radio-tehnike (prenos radio-signala), život savremenog čovjeka bio bi nezamisliv. Bio je vodeći naučnik pri izgradnji prve hidrocentrale u svijetu, na Nijagari (SAD).

elektromagnetnih talasa) i prenos poruka sa jednog mjesta prema velikom broju udaljenih korisnika (u jednom smjeru), što čini radio-difuzni prenos (radio i televizijski prenos).

Prva radio-stanica koja je emitovala vijesti počela je da radi 31. avgusta 1920. godine u Detroitu. Godine 1933. Edvin Armstrong je patentirao FM radio. Prva radio-stanica u Crnoj Gori počela je rad 27. novembra 1944, kada se u tek oslobođenom Cetinju oglašio Radio Cetinje, vijestima i izvještajima sa ratišta. Prvi tranzistorski radio-aparat proizveo je Sony, 1954. godine.

1.1.4. Televizijski prenos i prenos podataka

Prvi pokušaj prenosa slike izvršen je 1860. godine. Radilo se o prenosu statičke (nepokretne) slike. U više laboratorija na svijetu vršeni su eksperimenti za prenos dinamičke (pokretne) slike, to jest istraživanja za prenos televizijskog signala.

Godine 1927. prvi put je ostvaren prenos televizijskog signala, između Njujorka i Vašingtona. Prva javna demonstracija televizijskog prenosa izvršena je 1934. u Londonu, gdje je 1936. godine počelo emitovanje prvog TV programa koji objedinjuje prenos govora i prenos slike. Lenjingradska televizija (Lenjingrad, danas Sankt Peterburg, Rusija) uspješno je 1952. godine izvela eksperimentalno emitovanje TV programa u boji.

Prva televizijska slika (program italijanske televizije) u Crnoj Gori viđena je 1956. na Jezerskom vrhu na Lovčenu. Kao zvaničan početak rada Televizije Crne Gore, tada Televizije Titograd, uzima se 4. maj 1964. godine.

Početakom 21. vijeka uslijedio je prelaz sa analognih na digitalne TV sisteme.

Posebno mjesto u telekomunikacijama zauzima prenos računarskih podataka. Ova oblast prenosa često se naziva prenos podataka. Godina 1938. imala je velik značaj za razvoj digitalnih komunikacija, jer je tada dokazano da se prenos analognih signala može vršiti i digitalnim postupcima.

Laser, jedan od ključnih uređaja koji u modernim telekomunikacijama omogućuje prenos podataka optičkim vlaknima, razvijen je 1960. godine. Godine 1965. demonstriran je prenos podataka optičkim kablom. Prvi kablovi sa optičkim vlaknima koji su se mogli koristiti za prenos podataka proizvedeni su 1970-ih godina. Mreža ARPANET (preteča interneta) puštena je u rad 1969. godine.

Godine 1996. pojavio se kablovski modem. Iste godine definisan je ADSL (*asymetrical digital subscriber line*), standard za povezivanje računara na internet telefonskom linijom.

1.1.5. Satelitski prenos

Lansiranjem telekomunikacionih satelita otvara se nova era u oblasti telekomunikacija. Sovjetski Savez je 1957. lansirao prvi vještački satelit (Sputnjik).

U avgustu 1960. godine lansiran je „Echo 1“, prvi telekomunikacioni pasivni satelit (sateliti koji primljene signale sa Zemlje samo odbijaju prema određenom području na Zemlji); a oktobra iste godine „Courier IB“, prvi aktivni satelit. Savremeni telekomunikacioni sateliti po pravilu su aktivni, to jest primaju signale sa Zemlje, pojačavaju ih i šalju prema određenom području na Zemlji. Satelit nižih orbita TELSTAR 1 sa 60 telefonskih vodova lansiran je 1962. godine – omogućio je prvi TV prenos između kontinenata. Prvi eksperimentalni prenos TV slike u boji preko satelita ostvaren je 1965. godine. Globalni sistem za određivanje položaja (GPS) pušten je u civilnu upotrebu 1994. godine. U 1998. godini, pušten je u rad telekomunikacioni sistem nižih orbita IRIDIUM.

DODATAK +

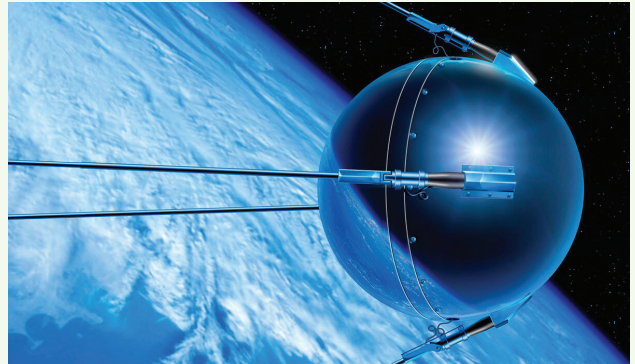
Sateliti se nosačima raketa odvoze u Zemljinu orbitu, i postavljaju na odgovarajućim orbitalnim visinama, po kojima kruže oko Zemlje u skladu sa fizičkim zakonima. Sateliti se nalaze na velikim visinama, čime se obezbjeđuje pokrivanje velikog područja na Zemljinoj površini. Visina orbita određuje i vrstu satelita. Tako imamo satelite nižih, srednjih i viših orbita, te geostacionarne satelite. Sateliti nižih orbita (LEO – *low-Earth-orbit satellites*) jesu sateliti koji kruže oko Zemlje na visinama ispod 2500 km. Na ovim visinama sateliti brzo rotiraju oko Zemlje, i za nešto manje od jednog sata opišu pun krug. Usljed velike brzine obrtanja oko Zemlje, brzo nestaju sa horizonta. Zbog toga se u ovim orbitama postavljaju nizovi satelita, kako bi se njima stalno pokrila neka površina na Zemlji. Takvi sateliti su Iridium (na visinama od 780 km), i Globalstar (1400 km). Motorolin Iridium, koji služi za komunikacije, sastoji se od 66 satelita u šest orbitalnih ravni. Sateliti srednjih orbita (MEO – *medium-Earth-orbit satellites*) postavljeni su na visinama do 10.000 km. Srednje orbite još uvijek su manje u upotrebi, ali će njihov značaj sve više rasti. Za sada su tamo masovno prisutni sateliti satelitske navigacije, Navstar i Glonass. Sateliti visokih orbita (HEO – *high-Earth-orbit satellites*) nalaze se na visinama 20.000 km. U ovu klasu satelita spadaju sateliti za globalno određivanje položaja (GPS – *Global Positioning System*).

Najbolje je rješenje da satelit bude neprekidno iznad iste tačke na Zemlji, kako bi stalno pokrивao površinu iznad koje se nalazi. Da bi se to ostvarilo, potrebno je da se satelit nalazi na takvoj orbiti u kojoj će se oko Zemlje okrenuti za isto vrijeme za koje se Zemlja okrene oko svoje ose. To je 23 časa, 56 minuta i 4 sekunde, koliko tačno traje jedan obrt Zemlje oko svoje ose. Zbog iste brzine rotacije satelita iznad Zemlje i Zemljine rotacije oko svoje ose, satelit postavljen u ovu orbitu uvijek će se nalaziti iznad iste površine. Takve orbite nazivaju se geosinhrone, a sateliti geostacionarni (GEO). Visina geosinhrone orbite iznosi 36.000 km. Geostacionarni sateliti

danas su najčešći tipovi korišćenih komunikacionih satelita. Nalaze se na kružnoj orbiti 35.863 km iznad površine Zemlje. Sa visine od 35.863 km satelit može da komunicira sa četvrtinom zemaljske kugle, a sa tri satelita, razdvojena za 120 stepeni, moguće je komunicirati sa cijelom Zemljom, isključujući Sjeverni pol i Južni pol.

ZANIMLJIVOST

Mala metalna kugla sačinjena od aluminijumskih legura, veličine košarkaške lopte, teška 83,6 kilograma, ostavljena je da kruži oko Zemlje na visini od 226 km do 947 km (slika 1.4). Satelit je 93 dana kružio oko Zemlje, načinio 1400 obrtaja, prešao 60 miliona kilometara, a zatim je ušao u guste slojeve atmosfere i izgorio. Njegova uloga bila je istraživanje svemira, kao i emisija radio-signala na određenim frekvencijama.



Slika 1.4. Satelit Sputnjik

1.1.6. Internet

Internet je globalna telekomunikaciona mreža, nastala povezivanjem velikog broja različitih mreža. Naziv je složen od riječi INTERnational NETwork (međunarodna mreža).

Nastao je šezdesetih godina 20. vijeka, u vrijeme hladnog rata, kao projekat američkog ministarstva odbrane radi prenosa vojnih i vladinih podataka u slučaju nuklearnog rata. Američka agencija za napredno istraživanje (ARPA – *Advanced Research Projects Agency Network*) razvijala je tehnologiju koja je imala za cilj da unaprijedi bezbjednost između kompanija koje su saradivale na vojnim projektima. Tako je stvorena računarska mreža pod nazivom ARPANET.

Prvobitna namjena ARPANET-a bila je da omogući da dva računara koji su na različitim lokacijama bezbjedno razmjenjuju podatke. Mreža se neprekidno razvijala, tako da je 80-ih godina prošlog vijeka povezivala više od 30.000 računara. Prvi korisnici ove mreže bili su istraživači i vojna lica. Mreža je bila komplikovana za korišćenje. To se promijenilo kada su Tim Berners Li i Robert Kajo, saradnici Evropskog centra za nuklearna istraživanja (CERN) u Ženevi, počeli da rade na interfejsima kako bi se olakšao pristup mreži i time „običnim korisnicima“ omogućilo da je koriste. Ključna promjena koju je uveo Li bila je da podaci smješteni u obliku fajlova postanu vidljivi u obliku stranica. Da bi to bilo moguće, osmislio je programski jezik interneta koji su morali da koriste svi koji su željeli da pristupaju stranicama preko mreže.

Ovaj jezik nazvao je – jezik za označavanje hiperteksta, HTML (*Hypertext Markup Language*). Svaka stranica dobila bi jedinstvenu adresu, URL (*Uniform Resource Locator* – uniformni lokator izvora), a računari bi ih međusobno dijelili kreirajući skup pravila nazvan protokol za prenos hiperteksta, HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). Li je nastavio da radi na razvoju mreže. Smislio je prefiks *www* za adrese (*World Wide Web*), stvorivši tako svjetsku mrežu koju danas koristimo – internet. Od tada je svako mogao da dodaje sopstvenu stranicu na internetu i dijeli njen sadržaj sa svijetom.

Krajem 20. i početkom 21. vijeka dolazi do eksplozivnog razvoja telekomunikacionih servisa i aplikacija zasnovanih na internetu. To je razmjenu informacija učinilo lako dostupnom sa bilo čijeg personalnog računara, odnosno pametnog telefona. Tokom 1980-ih razvijan je koncept lokalne računarske mreže (LAN – *local area network*) koji je 1990-ih počeo masovno da se primjenjuje. Tih godina počinje i primjena bežičnih lokalnih računarskih mreža (WLAN – *wireless LAN*).

DODATAK +

Mobilna telefonija je jedan od najbrže rastućih i najpopularnijih telekomunikacionih sistema. Jedan od glavnih razloga jeste činjenica da je ovaj sistem nastavak najrasprostranjenijeg telekomunikacionog sistema u svijetu – fiksne telefonije. Osim mogućnosti da komuniciraju međusobno, korisnici mreže mobilne telefonije mogu, pomoću odgovarajućih mrežnih prolaza, komunicirati i sa pretplatnicima fiksne telefonije. Mobilnost u mreži omogućuje radio-pristup, koji pretplatnicama obezbjeđuje veći broj radio-kanala za komunikaciju. Da bi se efikasno iskoristio frekvencijski spektar dodijeljen mobilnim pretplatnicima, definišu se odvojene geografske lokacije sa kojih pretplatnik mobilne mreže ima pristup određenom opsegu frekvencija. Takve oblasti se nazivaju ćelije. Zbog toga se i mobilna telefonija naziva celularnom (lat. *cellula* – ćelija). Ćelija je područje koje pokriva jedna bazna stanica.

Kada se govori o tehnologijama mobilne telefonije, one se obično dijele u nekoliko generacija. Sistemi prve generacije (1G) bili su analogni, projektovani samo za govorne komunikacije. Te sisteme zamijenili su digitalni sistemi druge generacije (2G), uglavnom namijenjeni za prenos govora. Ovi sistemi poznati su pod nazivom GSM (*Global System for Mobile Communication*). Međutim, organizacije za standarde utvrdile su da postoji potreba za tehnologijom 3G, koja bi bila pogodna i za govor i za prenos podataka.

Sistemi treće generacije (3G) projektovani su za mnogo veće brzine pristupa. Naredni standard u mobilnoj telefoniji jesu mreže četvrte generacije – 4G, LTE (*long-term evolution*). Među najvažnijim osobinama 4G sistema jesu veliki propusni opseg, lako povezivanje sa internetom, visokokvalitetne multimedijalne usluge.

Mreže pete generacije (5G), koje su se već počele koristiti u znatnom broju zemalja, omogućuju mnogo veće brzine preuzimanja i razmjenu podataka u realnom vremenu.

ZANIMLJIVOST

Pronalazak mobilnog telefona

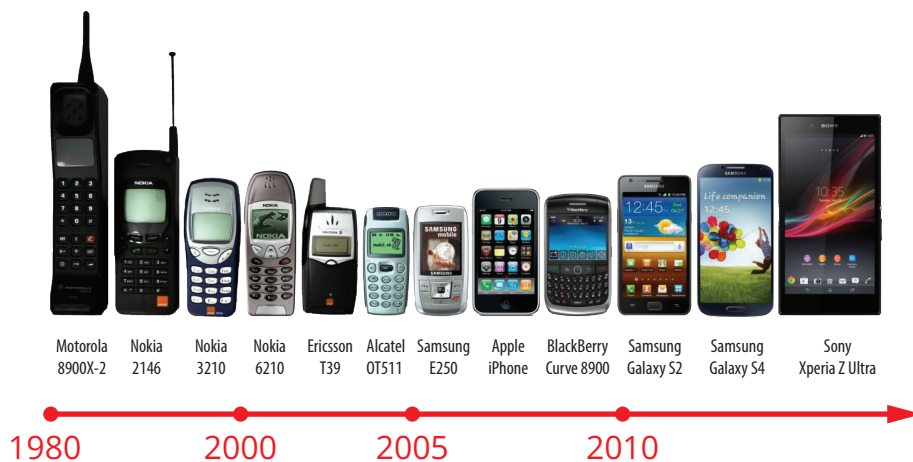
Martin Kuper, inženjer u kompaniji Motorola, pozvao je 3. aprila 1973. svog kolegu iz konkurentske kompanije za telekomunikacije i saopštio mu da govori „s pravog mobilnog telefona“. Prvi model mobilnog telefona, uz neuporedivo lošije performanse u odnosu na današnje, bio je duži od 20 cm i težine skoro 1 kg, a baterija mu je trajala pola sata.



Slika 1.5. Martin Kuper sa prvim modelima mobilnih telefona

1.1.7. Mobilna telefonija

Javna mobilna mreža jeste telekomunikaciona mreža za ostvarivanje komunikacije iz pokreta, posredstvom mobilnih telefona.



Slika 1.6. Evucija mobilnih telefona

Prvi analogni celularni mobilni sistem pušten je 1979. godine u Japanu. Godine 1991. prvi put je počeo da se koristi digitalni sistem mobilne telefonije, kada je mobilni operator Radiolinja prvi uveo GSM mrežu u Finskoj. GSM digitalni celularni mobilni sistem, namijenjen uglavnom za prenos govora, počeo je da se upotrebljava 1992, a telefonska komunikacija preko interneta ostvarena je 1997. Korišćenje mobilnih celularnih sistema treće generacije počinje 2003. godine. Četvrta generacija mobilne telefonske mreže, koju danas najviše koristimo, puštena je u rad 2009. godine u Oslu, Norveška. Prva komercijalna mobilna celularna mreža pete generacije puštena je u rad aprila 2019. u Južnoj Koreji.

ZANIMLJIVOST

Kratka istorija razvoja vodećih svjetskih kompanija, društvenih mreža, uređaja i servisa

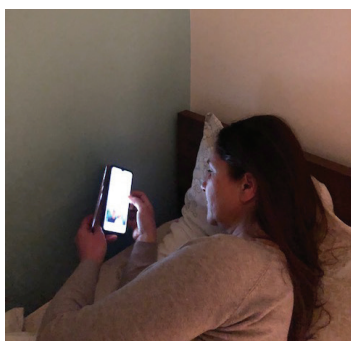
Majkrosoft (Microsoft) osnovan je 1975, a Ejpl (Apple) 1976. godine. Amazon je osnovan 1994. godine, a Gugl (Google), vodeći svjetski pretraživač interneta, 1998. godine. Fejsbuk (Facebook) je počeo da radi 2004. godine, a Tviter (Twitter) 2006. godine. Ajfon se pojavljuje na tržištu u junu 2007. godine. Operativni sistem Android (iPhone) predstavljen je novembra 2007. godine. Viber je osnovan 2010, a Zum (Zoom), namijenjen za održavanje video-konferencija, pokrenut je 2013. godine. Tiktok (TikTok) startovao je 2016. godine.



1.2. Pravci razvoja u telekomunikacijama



a)



b)

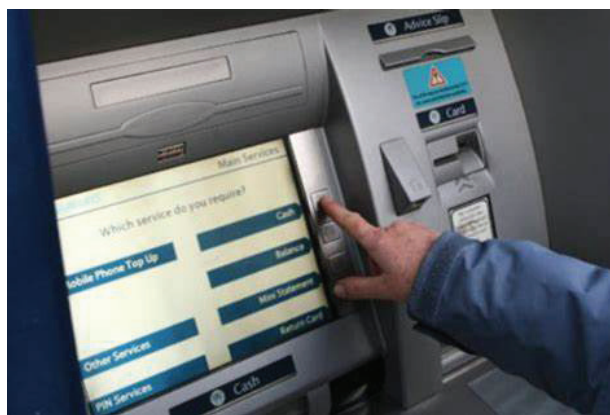
Slika 1.7. Komunikacija čovjek – čovjek: a) bilo gdje, b) bilo kada

Savremene komunikacione tehnologije razvijale su se u skladu sa pronalascima i razvojem tranzistora, mikroprocesora, računara, kao i optičkih medijuma za smještanje i prenos informacija. Do sredine prošlog vijeka računarski uređaji vršili su obradu podataka i njihovo pretvaranje u informacije, dok su telekomunikacioni uređaji prenosili informacije na daljinu. Ova dva pravca u tehnologiji do pedesetih godina prošlog vijeka razvijala su se skoro nezavisno. Tada počinje revolucija u telekomunikacijama koja je dovela do integrisanja računarskih i komunikacionih tehnologija u jedinstvenu informaciono-komunikacionu tehnologiju (ICT, *Information and Communications Technology*).

Prvobitni cilj telekomunikacija bio je da se omogući razmjena informacija među ljudima (engl. *human-to-human communication, H2H*). Razvoj savremenih telekomunikacionih sistema omogućio je ostvarivanje komunikacije među ljudima – ma gdje se nalazili i ma u kojem vremenu (slika 1.7).

Pri tome se komunikacionim sistemima između ljudi ne prenose samo informacije, već i neke druge važne komunikacione komponente, kao što su npr. emocije.

Komunikacija čovjek – mašina (engl. *human-to-machine, H2M*) jeste oblik komunikacije u kome ljudi komuniciraju sa uređajima koji im pružaju različite tipove usluga. Rad sa bankomatima, uređajima za kontrolu pristupa, četbotovi (chatbot, integrisani program za onlajn komunikaciju i interakciju sa korisnicima) – samo su neki primjeri komunikacije H2M sa kojom se svakodnevno susrećemo (slika 1.8).

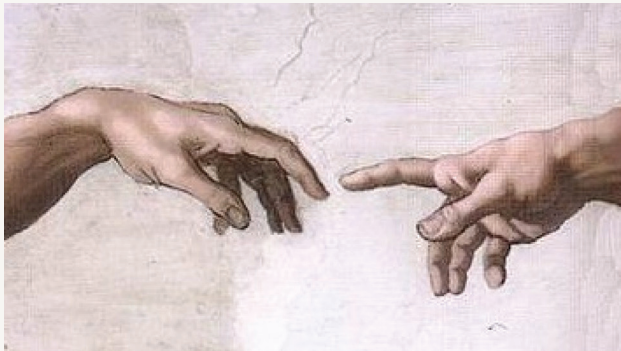


Slika 1.8. Komunikacija čovjek – mašina

Razvojem računarskih tehnologija, a posebno ekspanzijom interneta, komunikacije H2M imaju sve veću primjenu i dobijaju sve veći značaj.

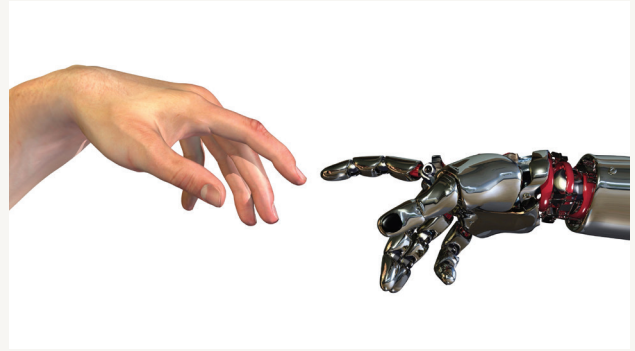
PRIMJER IZ PRAKSE

Računari, koji se danas koriste sve više u komunikacijske svrhe, dizajniraju se tako da način komuniciranja čovjek – računar što više približe načinu komunikacije među ljudima. Ljudi sada imaju mogućnost komunikacije sa virtuelnim asistentima i socijalnim robotima koji im olakšavaju svakodnevni život. Na slici 1.9 prikazan je fragment Mikelandelove slike „Stvaranje čovjeka“. Bog, Tvorac, koji je, saglasno



Slika 1.9. Dodir Boga i čovjeka, fragment Mikelandelove slike „Stvaranje čovjeka“

religijskom učenju, stvorio čovjeka, dodiranjem mu je prenio dio svojih moći – da bude svjestan sebe i okruženja, da može da stvara. Slika 1.10 nastala je po uzoru na fragment Mikelandelove slike. U ovom slučaju čovjek predstavlja tvorca, koji dodiranjem sa mašinom, robotom, prenosi mašini dio svojih moći, da može da radi i da ga mijenja u obavljanju poslova koje joj zada.



Slika 1.10. Dodir čovjeka i robota, po uzoru na Mikelandelovu sliku

Komunikacija mašina – mašina (engl. *machine-to-machine*, *M2M*) podrazumijeva komunikaciju ili razmjenu podataka između mašina (uređaja) bez učešća ljudi.

Primjer komunikacije M2M imamo na uređajima koji pomoću svojih senzora detektuju promjene u okolini, prenose podatke uređaju opremljenom softverom sposobnim da automatski, bez učešća ljudi, reaguje na odgovarajući način na detektovane promjene u okruženju.

Glavne komponente sistema M2M uključuju senzore, komunikacionu opremu i softver koji je programiran da pomogne uređaju da tumači podatke i donosi odluke.

Jedna od najpoznatijih vrsta komunikacije M2M jeste telemetrija, odnosno mjerenje na daljinu. Internet i razvoj bežičnih komunikacija doveli su do toga da M2M uređaje koristimo u svakodnevnom životu (električna brojila koja se daljinski očitavaju, uređaji povezani na internet, „pametne kuće“ i slično).

M2M sistemi u svom radu mogu da se oslanjaju na vještačku inteligenciju i mašinsko učenje, koji olakšavaju komunikaciju između sistema, i koji im omogućavaju donošenje odluka.

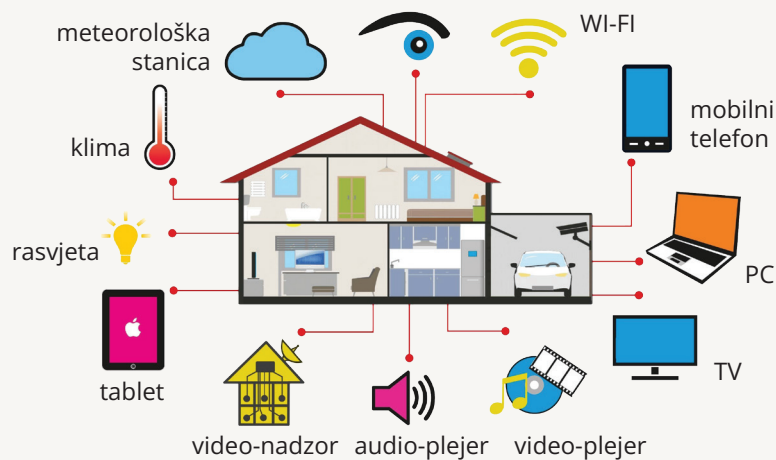
1.2.1. Internet stvari (*Internet of Things – IoT*)

Internet stvari (IoT) je nova tehnologija koja umrežava i povezuje uređaje. Umreženi uređaji i senzori postaju dio interneta stvari, što mijenja ulogu postojećeg interneta. Korišćenje IP protokola (*Internet Protocol*) omogućava razvoj mobilnih usluga čije su mogućnosti velike, kao npr. izgradnja pametnih kuća i stanova koji štede električnu energiju, i kojima se može upravljati sa udaljene lokacije. Zahvaljujući jeftinim računarskim čipovima i sveprisutnosti bežičnih mreža, moguće je bilo koji objekat pretvoriti u dio interneta stvari. Umrežavanje različitih objekata i dodavanje senzora na njih omogućiće da objekti komuniciraju u realnom vremenu, da mjere i obrađuju mjerene veličine bez angažovanja čovjeka. Skoro svaki fizički objekat može se transformisati u internet stvar ako se može povezati na internet da bi se kontrolisao ili prenosio informacije.

PRIMJER IZ PRAKSE

Koncept interneta stvari pri projektovanju pametnih kuća

IoT predstavlja novu tehnologiju koja omogućava umrežavanje kućnih uređaja u jedan sistem. Svaki uređaj u domaćinstvu može se umrežiti na više različitih načina i biti dio interneta stvari (zamrzivač, sijalica, bojler, frižider, računar, TV, kamera, muzički plejer, video-plejer itd.). Na taj način može se njima upravljati: uključiti ili isključiti ih, programirati vrijeme njihovog rada i slično. Time se povećava bezbjednost sistema, štedi se električna energija i olakšava svakodnevni život. Upravljanje se može vršiti pomoću neke internetske ili mobilne aplikacije, na različite načine, u realnom vremenu. Sa udaljene lokacije može se provjeriti status (stanje) svih povezanih potrošača u kući, i na taj način npr. uključiti bojler, tako da kad dođete kući imate toplu vodu. Na slici 1.11 prikazani su segmenti pametne kuće kao dio sistema IoT.



Slika 1.11. Pametna kuća sa svojim segmentima

Neki od segmenata sistema IoT prikazani su na slici 1.12. IoT objedinjava više sistema iz različitih oblasti: saobraćaj (upravljanje saobraćajnim znacima i semaforima), pametne kuće (upravljanje kućnim uređajima), pametna energetska mreža (upravljanje potrošnjom električne energije), industrijski sistemi (upravljanje procesom proizvodnje), javne ustanove i preduzeća (bolnice, škole – upravljanje velikom količinom podataka kroz razvoj i primjenu informacionih sistema), centar za čuvanje i obradu podataka (*cloud*) itd.



Slika 1.12. Internet stvari

ZANIMLJIVOST

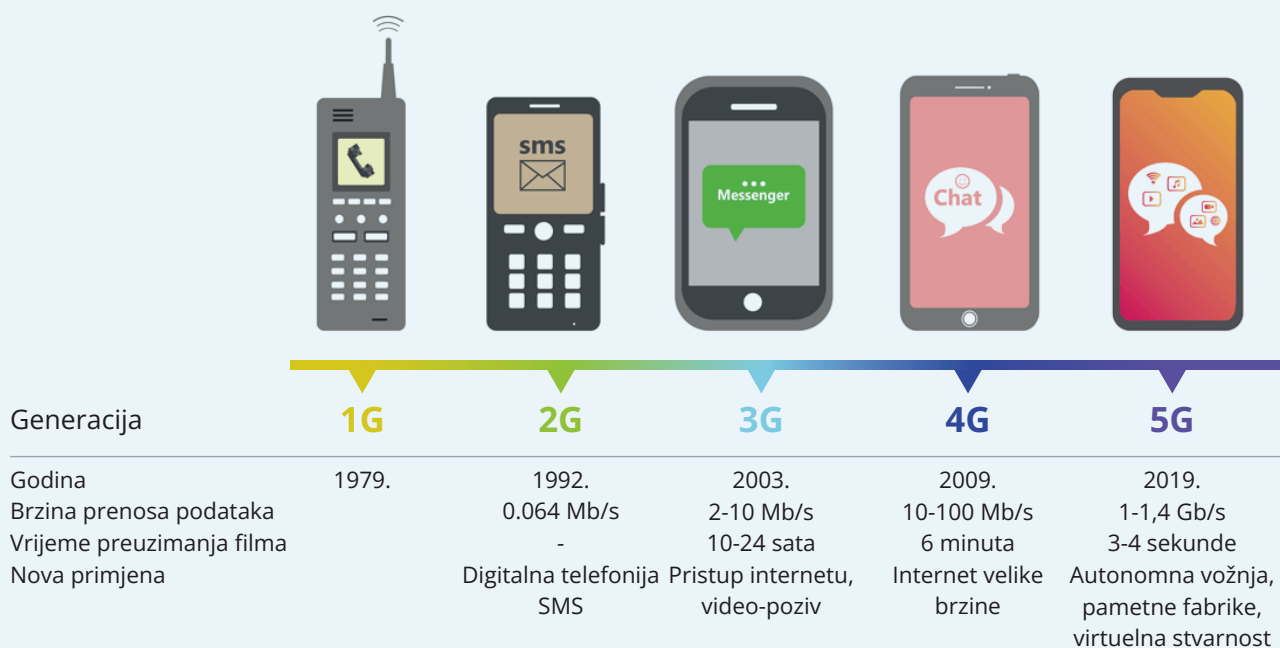
Industrijska revolucija predstavlja prelaz na nove proizvodne procese. Prva industrijska revolucija počinje pronalaskom parne mašine, odnosno korišćenjem energije pare u procesu proizvodnje. Druga industrijska revolucija koristila je u procesu proizvodnje električnu energiju, a treća je koristila elektroniku i informacione tehnologije kako bi automatizovala proizvodnju. Danas je u toku četvrta industrijska revolucija, zasnovana na trećoj, digitalnoj revoluciji koja je počela sredinom prošlog vijeka. Karakteriše je spajanje tehnologija, što dovodi do brisanja granica između fizičke, digitalne i biološke sfere. Četvrta industrijska revolucija ulazi u sve pore našeg života i mijenja ga: vještačka inteligencija (AI – artificial intelligence), robotika, nanotehnologija, kvantni računari, IoT, autonomna vozila, 3D štampa itd. Primjenom mobilne telefonije pete generacije (5G mreže) omogućiće se dalji razvoj telekomunikacionih sistema i usluga.

5G mreže

Postoje različite, pa ponekad i suprotstavljene koncepcije razvoja u današnjim telekomunikacijama. Ipak, nesporno je da će mobilni sistemi i internet, s obzirom na buran razvoj mobilnih tehnologija, kao i na sveobuhvatnu primjenu internetske tehnologije, biti temelji za dalji razvoj telekomunikacija. Jedna od tehnologija koja će imati veliku primjenu jeste peta generacija mobilne telefonije (5G).

5G je tehnologija budućnosti. Ona će promijeniti mobilno umrežavanje i omogućiti mnogo veće brzine preuzimanja i razmjene podataka u realnom vremenu. Ta tehnologija koristi milimetarski spektar talasnih dužina signala, radio-frekvenciju od 28 GHz (4G tehnologija koristi signale od 2,5 GHz). Vrijeme nastanka i primijenjeni servisi u mobilnim telekomunikacionim mrežama (po generacijama – tehnologijama) prikazani su na slici 1.13.

Infrastruktura za 4G ostaće ista i postaće dio nove 5G mreže, koja će uticati na prenos podataka, ali ne i na telefoniju.



Slika 1.13. Generacije mobilnih telekomunikacionih mreža

Tabela 1.1. Opsezi u 5G mrežama

Opseg	700 MHz	3,6 GHz	26 GHz
Primjena	Niske frekvencije nude potpunu pokrivenost. Služe za pružanje osnovnih usluga (prenos govora, podataka, internetski servisi), posebno u ruralnim sredinama.	Više uređaja može da šalje i prima podatke znatno brže nego na 700 MHz. Služe za pružanje usluga u gradskim sredinama.	Zbog kratkog dometa, potrebno je više antena. Pogodni su za primjenu u industriji ili na velikim skupovima.

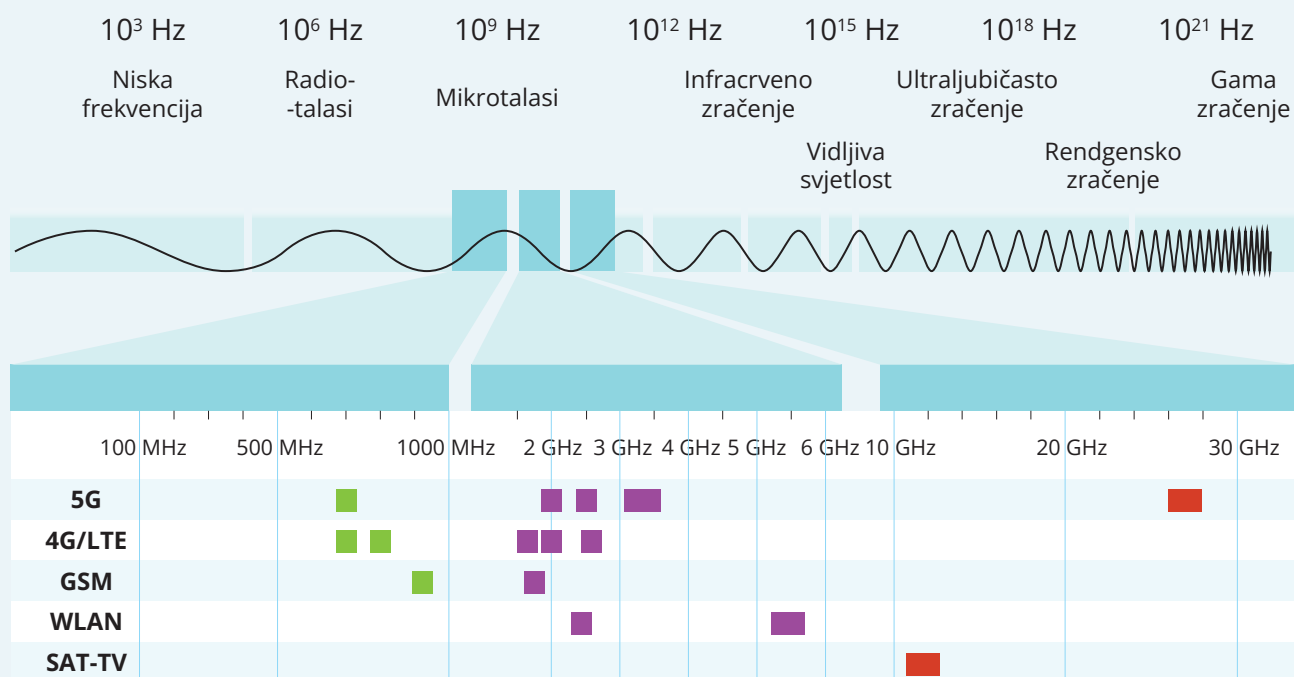
Teorijske brzine prenosa i obrade podataka u 5G mrežama dostižu vrijednosti od 20 Gb/s, dok će kašnjenja signala biti manja od 1 ms, što otvara mnoge mogućnosti. Na primjer, automobili sa autonomnim sistemom upravljanja moći će da razmjenjuju podatke velikom brzinom i da izbjegavaju sudare.

5G mreže rade u tri opsega učestanosti, pri čemu se, kako frekvencija raste, domet smanjuje a brzina protoka podataka povećava. Zbog toga su različiti opsezi pogodni za različite namjene, što je prikazano u tabeli 1.1.

Na slici 1.14 prikazan je frekvencijski opseg elektromagnetnih talasa sa oblastima primjene u telekomunikacijama. Jačina signala na većim frekvencijama brže opada sa rastojanjem u odnosu na signale koji se javljaju na nižim frekvencijama. To znači da operateri 5G telefonije moraju imati više baznih stanica manje snage kako bi mogli raditi na učestanostima koje su im dodijeljene.

Mnogobrojne su prednosti tehnologije 5G u odnosu na 4G. Pored znatno većih brzina prenosa i manjeg kašnjenja u prenosu signala, jedan predajnik u 5G mreži može da poveže do hiljadu puta više uređaja od 4G tehnologije. To je posebno značajno u rješenjima u industriji, npr. za upravljanje robotima u fabrikama ili za umrežavanje mobilnih uređaja velikog broja ljudi okupljenih na jednom mjestu.

Na kojim frekvencijama šta radi?



Slika 1.14. Frekvencijski opseg elektromagnetnih talasa

5G mreže nijesu samo brže, već su i pametnije od svojih prethodnika. To je zato što rade u više slojeva. Tako je, na primjer, jedan sloj koji radi na visokim frekvencijama odgovoran za prenos video-zapisa, drugi sloj manjih brzina obrađuje podatke sa senzora, a treći, koji koristi najniže frekvencije, izvršava lakše zadatke, kao što je slanje tekstualnih poruka.

Šta 5G donosi običnom korisniku? Sa 5G telefonima korisnik će moći da obavlja grafički složenije igre, kao one u virtualnoj stvarnosti. Onlajn (online) igre, koje zahtijevaju istovremeno učešće više korisnika, očekuje procvat, jer će kašnjenje signala biti veoma malo. Filmovi i drugi materijali sa interneta moći će da se preuzimaju još većom brzinom. Potrošnja struje biće manja.

Da li je 5G telefonija opasna po zdravlje? Osnovni je strah da ćemo biti okruženi hiljadama baznih stanica koje će nas sa svih strana bombardovati milimetarskim talasima.

Milimetarski talasi spadaju u nejonizujuća zračenja, i biolozi su utvrdili da su ona mnogo manje opasna po zdravlje od jonizujućih, kao što su rendgensko ili gama zračenje. Međutim, svi koji se bave radio-tehnologijama svjesni su mogućih štetnih uticaja zračenja uređaja koji koriste radio-talase. Stepem štetnih dejstava po ljude zavisi od toga koliko se energije koristi za emitovanje signala, koliko se korisnici nalaze blizu antene (posebno mobilnog telefona) i koliko dugo. Ako uzmemo u obzir i činjenicu da već decenijama koristimo uređaje koji rade na istim frekvencijama namijenjenim za 5G, kao što su radari i satelitska televizija, onda se može očekivati da i 5G telefonija neće ugrožavati zdravlje ljudi više od ostalih tehnologija koje koriste frekvencije iz spektra milimetarskih talasa.

Kako bi se uticaj zračenja kontrolisao i sveo na najmanju moguću mjeru, postoji velik broj standarda koji regulišu ovu materiju. Prema standardu koji važi u našoj zemlji, u opsegu 2–300 GHz referentni nivo jačine električnog polja za opštu javnu izloženost iznosi 61 V/m. Proizvođači komercijalne radio-opreme moraju prije upotrebe testirati svoje uređaje u skladu sa standardima koji propisuju bezbjedne snage zračenja.

1.3. Model telekomunikacionog sistema

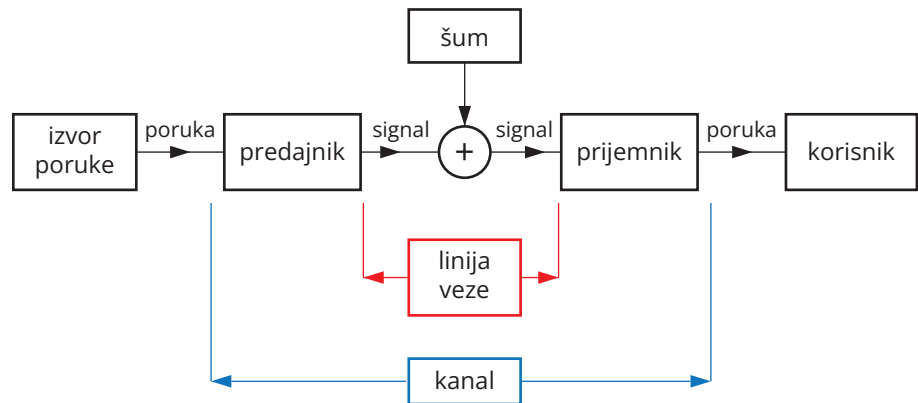
Rekli smo da su telekomunikacije oblik komunikacije koji omogućuje razmjenu informacija, odnosno poruka na daljinu. Proces razmjene informacija obuhvata proces stvaranja ili generisanja informacije i njen prenos. Informacija u telekomunikacijama je npr. govor, slika, podatak. Međutim, ona se ne može prenositi u svom osnovnom obliku, već je njen prenos moguć jedino ako se pretvori u odgovarajući električni oblik. Ovakav oblik nazivaćemo **signal**.

Uopšteno govoreći, signali predstavljaju mjerljive veličine koje nose informaciju o nekom vremenski promjenljivom fizičkom procesu.

Na primjer, govorni signal je onaj koji se dobija na izlazu iz mikrofona, video-signal dobija se na izlazu kamere, signal podataka jeste signal na izlazu iz umreženog računara.

Telekomunikacioni sistem omogućava prenošenje informacija između dva ili više udaljenih korisnika, putem prenosnog medija ili linije veze. Dakle, telekomunikacioni sistem obuhvata uređaje koji generišu informaciju, uređaje koji informaciju pretvaraju u signal, uređaje koji signal obrađuju na način pogodan za prenos, uređaje koji ga prenose na daljinu i, na kraju, uređaje koji signal pretvaraju u informaciju prilagođenu korisniku.

Ovakav telekomunikacioni (TK) sistem može da se predstavi različitim modelima. Jedan od osnovnih modela telekomunikacionog sistema jeste Šenonov model, prikazan na slici 1.15.



Slika 1.15. Opšti model telekomunikacionog (TK) sistema



Klod Šenon (1916–2001), američki naučnik i inženjer. Svojim radovima iz oblasti teorije informacija i dizajna digitalnih računara dao je značajan doprinos nauci i tehnici.

Telekomunikacioni sistem sastoji se od izvora poruke, kanala i korisnika informacije. Kanal čine predajnik, linija veze i prijemnik sa izvorom šuma. Telekomunikacioni sistem sa slike 1.15. predstavlja model realnog telekomunikacionog sistema za analogni ili digitalni prenos podataka, zavisno od oblika i vrste signala koji se obrađuje i prenosi.

Opišimo ulogu blokova na slici 1.15.

Korisnici pristupaju sistemu, odnosno telekomunikacijskim uslugama, pomoću krajnjih uređaja (telefon, telefaks, računar). Ti uređaji predstavljaju **izvor poruke**, odnosno izvor informacije, i oni generišu poruke (zvuk, slika, podaci) koje treba prenijeti korisniku. Izvor poruke može biti i čovjek. Da bi se poruka prenijela, potrebno ju je pretvoriti u odgovarajući signal (električni ili svjetlosni). Osim toga, signal treba obraditi na način pogodan za prenos. Uređaj u kojem se obavljaju ove funkcije naziva se **predajnik**.

Prenosni medijum ili **linija veze** jeste sredina kroz koju se signal prenosi od predajnika do prijemnika. To može da bude bakarni provodnik, optičko vlakno ili slobodan prostor kroz koji se signal prenosi putem radio-talasa. Pri prenosu signala kroz ove sredine, postoje izvjesne smetnje. One utiču na oblik signala i smanjuju mu kvalitet. Smetnje se na strani korisnika različito ispoljavaju. Tako, na primjer, pri telefonskom razgovoru ili pri slušanju radio-programa može da se javi pucketanje ili šuštanje; pri gledanju televizije javlja se svjetlucanje slike. Te smetnje nazivaju se **šum**. Šumovi nastaju od prirodnih ili vještačkih izvora duž linije veze, i oni utiču na oblik signala koji dolazi do prijemnika. Kvalitet linije veze mjeri se različitim kriterijumima, kao što su jačina signala, odnos snage korisnog signala i snage šuma, broj grešaka nastalih usljed kolizije ili interferencije različitih signala (miješanje signala po vremenu ili učestanosti) koji se prostiru istim medijumom i sl.

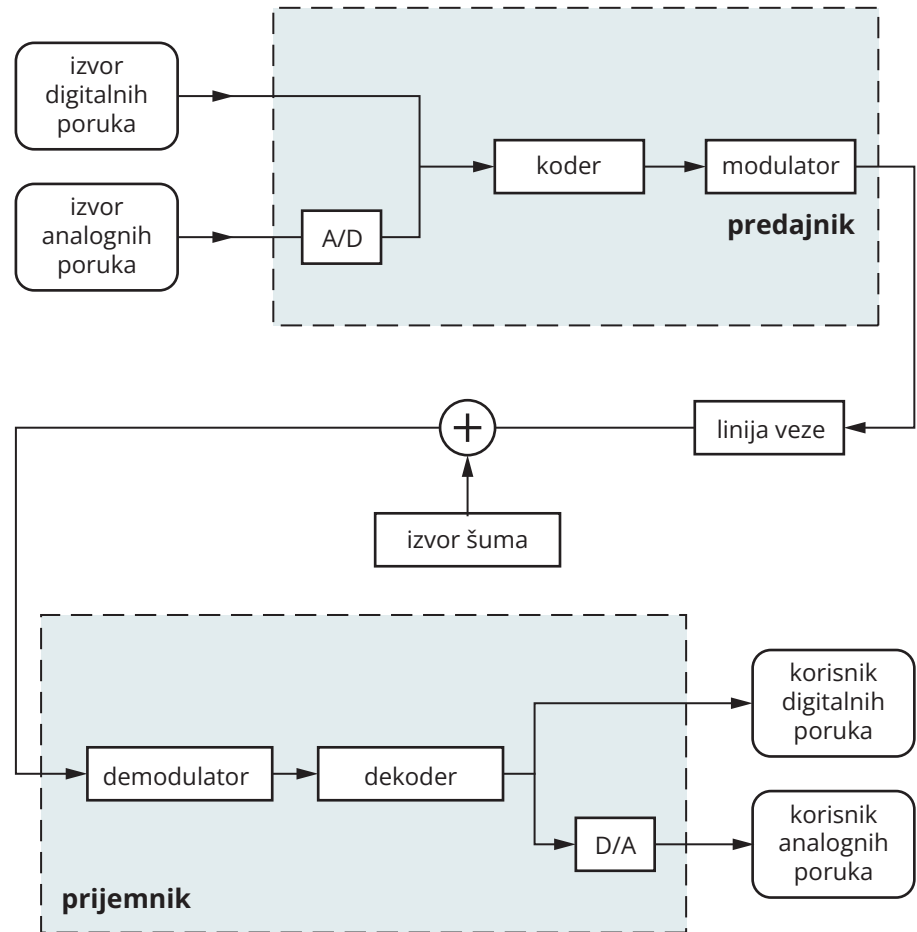
Prijemnik je uređaj koji obavlja operaciju inverznu onoj u predajniku: transformiše primljeni signal u poruku identičnu onoj koja je nastala na izlazu iz izvora poruke. Dakle, u prijemniku se vrši obrada primljenog signala tako da bude pogodan za pretvaranje (konverziju) u odgovarajuću zvučnu poruku, video-poruku ili podatak.

Predajnik i prijemnik, sa linijom veze koja ih povezuje, čine **kanal**.

Korisnik predstavlja osobu ili uređaj kome je poruka namijenjena.

Opšti trend u savremenim telekomunikacijama jeste digitalizacija. Danas su skoro svi telekomunikacioni sistemi digitalni, što znači da takvi sistemi prenose digitalne podatke putem računara. Digitalizacija je postupak pretvaranja analognog signala u digitalni, što znači da se digitalnim telekomunikacionim sistemima mogu prenositi i analogni signali. Telefoniranje se sve češće obavlja putem računara, televizijski prenos vrši se kroz digitalne sisteme.

Detaljnija šema modela za prenos digitalnih signala, zasnovanog na Šenonovom modelu, prikazana je na slici 1.16. Taj sistem obuhvata prenos i analognih i digitalnih signala, pri čemu se analogni u predajnom dijelu sistema konvertuju u digitalne. U prijemnicima se vrši obrnut postupak: digitalni se transformišu u analogne signale.



Slika 1.16. Detaljniji model telekomunikacionog sistema

Opišimo ulogu blokova na slici 1.16.

Izvori poruke generišu poruke koje treba prenijeti korisniku. Oni mogu biti digitalni i analogni. Izvor digitalnih poruka je, na primjer, računar. Ako su poruke analogne (zvuk, video), potrebno ih je pretvoriti u digitalne signale. Taj proces obavlja se u posebnim uređajima predajnika za analognodigitalnu konverziju, koji se nazivaju **A/D konvertori**. Na prijemnoj strani telekomunikacionog uređaja, u **D/A konvertoru**, vrši se obrnuti postupak – pretvaranje digitalnog signala u analogni.

Poslije postupka A/D konverzije potrebno je dobijeni digitalni signal pretvoriti u digitalni format pogodan za dalju obradu signala. Kodiranje (engl. *encoding*), koje se obavlja elektronskim sklopovima (**koderima**), u informaciono-komunikacionim tehnologijama označava postupak pretvaranja

informacije ili podataka iz jednog oblika u drugi, korišćenjem određenog sistema simbola iz nekog konačnog skupa simbola. Svaku govornu ili pisanu informaciju moguće je iskazati ili kodirati iz skupa, na primjer od 30 simbola. Kodiranje ima višestruku namjenu. Jedna od njih može biti smanjenje veličine audio ili video-fajlova, odnosno kompresija, pomoću koje se svaka poruka predstavlja minimalnim brojem bita, pri čemu vjerodostojnost poruke neće biti narušena. Druga namjena jeste da se što je moguće više smanji vjerovatnoća greške u prenosu; treća da se izvrši zaštita kodirane poruke dodavanjem zaštitnih bitova i tako dalje. Postupak inverzan kodiranju zove se dekodiranje, a uređaj na prijemnoj strani, u kojem se taj postupak obavlja, naziva se **dekoder**. U prijemniku se vrši dekodiranje podataka, što znači da se poruke prevode iz niza simbola u oblik koji je razumljiv korisniku.

Električni signali, posebno pravougaoni digitalni, jesu složeni signali. Sastoje se od velikog signala različitih učestanosti koji predstavljaju njihove komponente. Ako bi se kroz prenosni sistem prenosile sve komponente signala, za to bi bili potrebni ogromni frekvencijski opsezi, što je neizvodljivo u praksi. Zbog toga se ne prenose sve komponente signala, već samo one pomoću kojih se signal može rekonstruisati tako da skoro u potpunosti odgovara originalu. Drugim riječima, pri prenosu signala, njegovi frekvencijski opsezi se ograničavaju do granice kojom nije ugrožen njegov kvalitet, odnosno prepoznatljivost. Dalje, signali koji nastaju konverzijom poruke niskih su frekvencija, i kao takvi nijesu pogodni za prenos u formi elektromagnetnog talasa (EMT). Signali viših frekvencija znatno su pogodniji za prenos bežičnim putem. Iz ovih, a i iz drugih razloga, u predajniku se vrši **modulacija** signala. Postupkom modulacije signal poruke utiskuje se u signal visoke frekvencije (koji se naziva signal nosioca) mijenjanjem nekog od parametara visokofrekventnog (VF) signala u skladu sa promjenama signala poruke. Moduliraju se i analogni i digitalni signali. Postupak modulacije obavlja se u **modulatoru**.

Na prijemnoj strani uređaja vrši se obrnut postupak: iz signala nosioca izdvaja se signal poruke. Ovaj postupak naziva se **demodulacija**, a uređaj u kojem se to obavlja **demodulator**.

Linija veze je medijum za prenos signala. Najčešće se koriste kablovi, optički vodovi i radio-veze. U sklopu linije veze djeluje i izvor šuma. Kod digitalnih sistema, parametar koji ocjenjuje kvalitet kanala najčešće je vjerovatnoća greške bita na kanalu.

Komunikacioni model koji se sastoji samo od predajnika i prijemnika, u upotrebi je kod radio-difuznih sistema (radio i televizija). U radiju i televiziji podaci se prenose od jednog predajnika ka više prijemnika. Najčešće su predajnik i prijemnik smješteni u istom telekomunikacionom uređaju (primopredajnom uređaju, primopredajniku). Takvi uređaji su telefonski aparati, faks-uređaji, radio-stanice, računari itd. U praksi su **modulator** i **demodulator** sadržani u zajedničkom uređaju, koji se naziva **modem**.

1.4. Povezivanje otvorenih sistema na principu OSI referentnog modela

NAPOMENA

Osim standarda, postoje i preporuke. Razlika između standarda i preporuke je u tome što je preporuka savjet, koji postaje standard kada se zvanično prihvati. Iako je standard važniji od preporuke, i preporuka je često u međunarodnoj upotrebi.

Razvoj telekomunikacija je veoma brz. Kako danas postoji mnogo proizvođača telekomunikacione opreme, bez njihovog usklađivanja u procesu proizvodnje i korišćenja nastali bi veliki problemi u radu telekomunikacionih sistema. Zbog toga postoje **standardi** koji propisuju načine na koji se uređaji proizvode, principe na kojima rade, njihove tehničke karakteristike, protokole kojima ostvaruju povezivanje i sl., čega se proizvođači moraju pridržavati. Standard je javno dostupan dokumenat koji donosi nadležan organ. Njime se utvrđuju propisi, zahtjevi, karakteristike, uputstva koja uređuju određenu oblast.

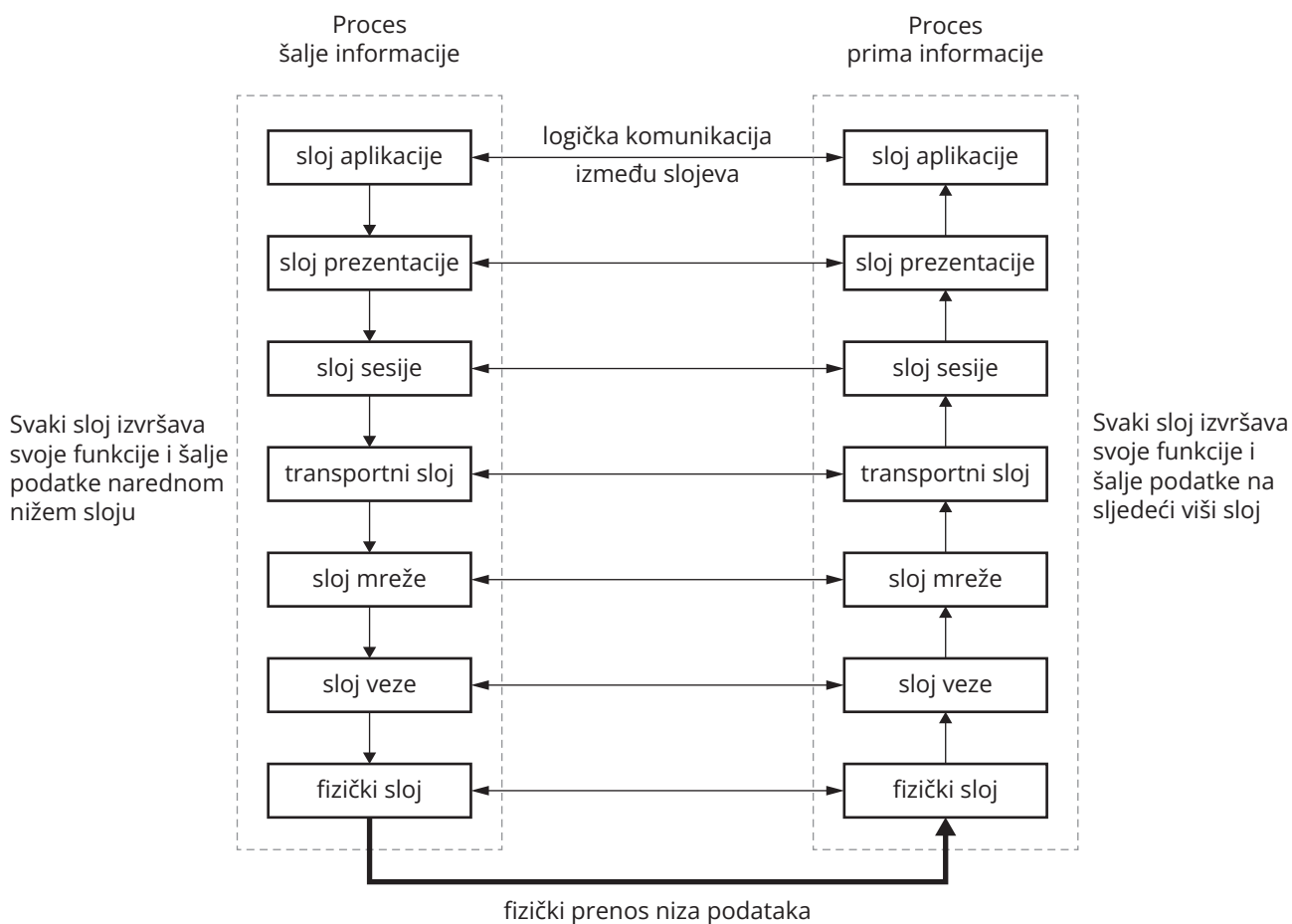
Standarde i preporuke propisuju međunarodne i nacionalne organizacije. Najpoznatija međunarodna organizacija za standarde u telekomunikacijama jeste Međunarodna unija za telekomunikacije (*International Telecommunication Union – ITU*).

Međunarodne standarde donosi i objavljuje Međunarodna organizacija za standardizaciju (*International Standards Organization, ISO*). Jedna od najvažnijih aktivnosti ISO jeste razvoj računarskih sistema i definisanje protokola za komunikaciju pomoću računara. Referentni model OSI (engl. *Open System Interconnection*) najpoznatiji je rezultat aktivnosti ISO. Sistemi koji se zasnivaju na referentnom OSI modelu nazivaju se otvoreni sistemi. OSI predstavlja referentni model za otvoreno povezivanje računara, dijeleći proces računarskih komunikacija u sedam nivoa. OSI definiše ulogu svakog nivoa, čime se omogućava standardizacija **interfejsa** (engl. *interface* – veza, sprega) i olakšava razvoj komponenti na različitim nivoima modela OSI, nezavisno od komponenti na drugim nivoima.

OSI referentni model predstavlja se sa sedam nivoa, koji se nazivaju slojevi (engl. *layers*). Slojevi na jednom računaru izvršavaju specifične funkcije i komuniciraju sa istim slojevima na drugom računaru. Istovremeno, svakom od slojeva dozvoljeno je da komunicira sa slojem ispod, odnosno sa slojem iznad u istom računaru. Ako dođe do bilo kakvih promjena u bilo kom sloju, to neće uticati na susjedne slojeve.

Na slici 1.17 prikazana je organizacija sedmoslojnog OSI modela, sa komunikacijom ostvarenom pomoću OSI protokola.

Kada računar pošiljaoca želi da pošalje poruku, predaje je sloju aplikacije. Taj sloj izvršava svoju funkciju, oblikuje poruku u grupu bitova koja se naziva paket, a zatim prosljeđuje paket sloju ispod, sloju prezentacije. Sloj prezentacije dodaje primljenom paketu odgovarajuće zaglavlje, i tako generisan novi paket spušta sloju ispod. Ovaj proces nastavlja se sve dok se podaci



Slika 1.17. Organizacija sedmoslojnog OSI modela, sa komunikacijom ostvarenom pomoću OSI protokola

ne prenesu do fizičkog sloja, koji prenosi podatke u obliku bitova. Postupak dodavanja zaglavlja sa bitovima podataka na svakom sloju komunikacionog procesa, pri predaji podataka, naziva se **enkapsulacija podataka**.

Na računaru koji prima poruku proces se izvodi obrnutim redoslijedom, uzlazno od jednog do drugog sloja, pri čemu se u svakom sloju sa njega uklanja odgovarajuće zaglavlje. Najviši sloj u računaru primaoca prima originalnu poruku poslatu od strane pošiljaoca. Po prijemu podataka iz nižeg sloja, viši sloj odbacuje zaglavlje nižeg sloja. Proces uklanjanja zaglavlja na svakom sloju komunikacionog procesa naziva se **deenkapsulacija podataka**.

Sloj aplikacije, najviši sloj, komunicira direktno sa korisnikom ili sa aplikativnim programima. Naziv je dobio po tome što omogućava mrežne aplikacije, kao što su npr. elektronska pošta ili pristup sajtovima na internetu.

Sloj prezentacije odgovoran je za predstavljanje podataka u obliku koji korisnik razumije. Na primjer, podatke koji odgovaraju nekoj slici pretvara u odgovarajući format koji korisniku omogućuje da sliku vidi na monitoru svog

Enkapsuliranje i deenkapsuliranje podataka možemo zamisliti kao analogiju sa poštanskom službom. Želimo nekome da pošaljemo pismo. Na papiru napišemo željeni sadržaj, i to je korisna informacija koju želimo da dostavimo primaocu. Papir sa porukom moramo staviti u koverat (moramo ga enkapsulirati), napisati ime i prezime primaoca, ulicu i broj, poštanski broj, grad i državu. I tek sa tim informacijama (koje primaocu ne znače mnogo – kad primi pismo otvoriće koverat, odbaciti ga, a uzeti da

pročita poruku napisanu na papiru) možemo očekivati da će poštanska služba dostaviti pošiljku na željenu adresu. Ako želimo da, osim navedenih podataka, označimo pošiljku kao prioritetnu ili običnu, ili ako želimo povratnu informaciju, onda moramo pružiti podatke i o pošiljaocu. Koverta sa podacima može da se posmatra kao zaglavlje, odnosno kao skup dodatnih informacija koje ne mijenjaju sadržaj poruke ali su neophodne za proces komunikacije.

računara. Osim toga, vrši kompresiju/dekompresiju podataka. Kompresija je postupak sažimanja podataka, tj. smanjenje veličine poruke redukcijom bitova koji je sačinjavaju, bez gubljenja njenog značenja. Kompresijom se smanjuje količina podataka koji se prenose telekomunikacionim sistemom, a samim tim povećava se i brzina prenosa. Dekompresija je postupak obrnut kompresiji.

U sloju prezentacije, radi zaštite podataka, vrši se njihovo šifrovanje i dešifrovanje.

Sloj sesije sadrži protokole potrebne za uspostavljanje i održavanje veze. Omogućuje uspostavljanje logičke veze između aplikacija na dva računara, odnosno obezbjeđuje konekciju između dva korisnika.

Sloj transporta obezbjeđuje komunikaciju između procesa na računarima. U ovom sloju se na predajnom računaru podaci rastavljaju u blokove ili pakete podataka koji su pogodni za prenos. U sloju transporta ovi paketi podataka nazivaju se **segmenti**. Sloj transporta obezbjeđuje prenos segmenata do prijemnog računara.

Sloj mreže omogućuje uspostavljanje komunikacije između računara u istoj ili različitim mrežama. Sadrži algoritme dizajnirane za pronalazak najpovoljnijih putanja za prenos podataka između dva krajnja uređaja. Sloj mreže zadužen je za protokole rutiranja, odnosno za protokole koji obezbjeđuju povezivanje mreža za prenos podataka. Paketi podataka ovog sloja nazivaju se **datagrami**.

Sloj veze nadgleda tok informacija kroz mrežu, sprečavajući sudare (kolizije) paketa na mreži. Ovaj sloj kontrolira i ispravnost prenošenih podataka, primjenom algoritama za detekciju i korekciju grešaka. Paketi podataka sloja veze nazivaju se **okviri**.

Fizički sloj prvenstveno je zadužen za medijum za prenos signala, kao i za načine na koji se ti signali prenose. Najčešće korišćeni medijumi jesu

bakarni kablovi sa upredenim paricama i koaksijalni kablovi, optička vlakna i elektromagnetni talasi, koji će biti objašnjeni u narednim poglavljima udžbenika. Svaki od ovih medijuma ima specifične karakteristike, od kojih zavise ograničenja količine informacija koje je moguće prenijeti u jedinici vremena, kao i vjerovatnoća pojave smetnji na liniji veze. Ako se radi o prenosu digitalnih poruka, fizički sloj prenosi bitove podataka. U ovoj knjizi uglavnom ćemo izučavati fizički sloj OSI modela.

U tabeli 1.2 dat je pregled slojeva i funkcija OSI modela.

Tabela 1.2. Pregled slojeva i funkcija OSI modela

Sloj	Funkcije
7. Aplikacije	Obezbeđuje pristup sajtovima na internetu, elektronsku poštu i druge korisničke servise
6. Prezentacije	Prevodi formate podataka, šifrjuje i dešifrjuje podatke
5. Sesije	Sinhronizuje učesnike u komunikaciji, vrši procedure oporavka od grešaka
4. Transportni	Obezbeđuje pouzdanost prenosa od jednog do drugog kraja veze, fragmentira i defragmentira pakete
3. Mreže	Obuhvata koncepcije adresiranja odredišta i određivanje puta između krajnjih korisnika (rutiranje paketa)
2. Veze	Definiše formate okvira, detektuje i ispravlja greške
1. Fizički	Definiše standard za fizičko povezivanje korisničkih uređaja, prenosi fizičke podatke – bitove

1.4.1. Petoslojni TCP/IP referentni model

Drugi glavni model slojevite arhitekture naziva se TCP/IP referentni model. Njega nije definisala neka organizacija nadležna za izradu standarda, nego je proizašao iz praktične primjene dva ključna protokola na kojima je zasnovan internet: TCP (*Transmission Control Protocol* – protokol za kontrolu prenosa) i IP (*Internet Protocol* – internet-protokol). TCP je komunikacijski standard koji omogućava aplikacijskim programima i računarskim uređajima da pouzdano razmjenjuju poruke preko mreže. Dizajniran je za slanje paketa preko interneta i za obezbjeđenje uspješne isporuke podataka i poruka preko mreža. Internet-protokol definiše IP datagram kao osnovnu jedinicu informacija koja se prenosi internetom i 32-bitnu IP adresu koja se dodjeljuje svakom računaru na internetu.

TCP/IP referentni model organizovan je u pet slojeva – četiri softverska sloja, koji se nadograđuju na peti, hardverski sloj. Na slici 1.18 prikazan je koncept TCP/IP petoslojnog referentnog modela.



Slika 1.18. Koncept TCP/IP petoslojnog referentnog modela

Poređenjem sedmoslojnog OSI referentnog modela sa TCP/IP modelom, zapažamo da slojevi prezentacije i sesije ne postoje zasebno kod TCP/IP modela. Njihovu ulogu preuzima aplikacioni sloj.

Na najvišem sloju (sloj aplikacije) korisnik poziva aplikacije koje pristupaju uslugama koje nudi internet. Aplikacija komunicira sa jednim od protokola transportnog sloja da bi poslala ili primila podatke.

Transportni sloj obezbjeđuje komunikaciju od jedne do druge aplikacije pomoću adresa procesa, koje se nazivaju adrese portova. Takođe reguliše protok informacija i može da obezbijedi pouzdan transport, osiguravajući da podaci stižu u odgovarajućem redosljedu i bez grešaka.

Mrežni sloj upravlja komunikacijom između računara na osnovu adresa, koje se nazivaju IP (*Internet Protocol*) adrese. Ovaj sloj prihvata zahtjev za slanje paketa iz transportnog sloja zajedno sa identifikacijom računara kome paket treba da se prenese. On enkapsulira paket u IP datagram, popunjava zaglavljje datagrama, koristi algoritam usmjeravanja kako bi odredio putanju kojom se datagram upućuje, te prosljeđuje datagram sloju veze da bi bio dalje prenesen.

NAPOMENA

Referentni model TCP/IP nije zvanično odobren i priznat kao standard od strane nadležnih organizacija, kao što je npr. Međunarodna organizacija za standarde – ISO, ali je široko prihvaćen, pa predstavlja stvarni, odnosno *de facto* standard u računarskim mrežama.

Sloj veze odgovoran je za prihvatanje IP datagrama i njegov prenos preko određene mreže. On enkapsulira IP datagram u okvir, dodaje mu zaglavljje sa fizičkom adresom računara – MAC adresom, odnosno adresom mrežne kartice kojom se računar povezuje sa mrežom (*MAC, Media Access Control* – upravljanje pristupom medijumu) i okvir predaje fizičkom sloju.

Fizički sloj (sloj hardvera) fizički povezuje računare posredstvom odgovarajućih medija (bakarni kablovi, optički vodovi ili bežično) i vrši prenos podataka u formi bitova.

Rezime

- ▶ Pod telekomunikacijama se podrazumijeva emitovanje, prenos i prijem poruka (govor, zvuk, tekst, slika ili podaci) u vidu signala, korišćenjem žičnih, radio, optičkih ili drugih sistema prenosa na daljinu.
- ▶ Telekomunikacije su se kroz istoriju razvijale od komunikacija čovjek – čovjek, preko komunikacije čovjek – mašina, do komunikacije mašina – mašina i koncepta interneta stvari (IoT).
- ▶ Glavni elementi telekomunikacionog sistema jesu: izvor informacija, predajnik, prenosni medijum, prijemnik i korisnik. Korisnici pristupaju sistemu pomoću krajnjih uređaja koji predstavljaju izvor poruke, i oni generišu poruke koje treba prenijeti. Poruka se u predajniku pretvara u odgovarajući električni signal. Prenosni medijum ili linija veze jeste sredina kroz koju se signal prenosi od predajnika do prijemnika. Pri prenosu signala kroz ove sredine, postoje odgovarajuće smetnje koje utiču na oblik signala i koje mu smanjuju kvalitet. Ove smetnje nazivaju se šum. Prijemnik je uređaj koji obavlja operaciju inverznu onoj u predajniku: transformiše primljeni električni signal u poruku, identičnu onoj koja je nastala na izlazu iz izvora poruke.
- ▶ OSI dijeli proces računarskih komunikacija na odgovarajuće nivoe, definišući pri tome ulogu svakog nivoa, omogućava standardizaciju interfejsa i olakšava razvoj komponenti na različitim nivoima OSI modela, nezavisno od komponenti na drugim nivoima. OSI referentni model predstavlja se sa sedam nivoa, koji se nazivaju slojevi: sloj aplikacije, prezentacije, sesije, sloj transporta, mrežni sloj, sloj veze i fizički sloj. Slojevi na jednom računaru izvršavaju specifične funkcije i komuniciraju sa istim slojevima na drugom računaru. Istovremeno, svakom od slojeva dozvoljeno je da komunicira sa slojem ispod, odnosno slojem iznad u istom računaru.

Manje poznate riječi

fragment – dio neke cjeline; virtuelan – prividan; ekspanzija – širenje; kolizija – sudar; detektovati – opaziti, utvrditi postojanje; medijum – sredina u kojoj se

nešto izvršava; sesija – sjednica, period zasijedanja; kolizija – sudar; fragmentacija – podjela, parčanje, rastavljanje; defragmentacija – sastavljanje.

Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko želiš da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *M. Dukić: Principi telekomunikacija Akademska misao, Beograd, 2014*. U njoj je dat detaljan prikaz istorijskog razvoja telekomunikacija, objašnjeni standardi i navedene organizacije koje ih donose, objašnjen značaj telekomunikacija

u društvu i naznačeni dalji pravci razvoja. Osim ove knjige, korisno je da pristupiš veb-stranici, *I. Radusinović, E. Kočan, S. Tomović: Osnovi telekomunikacija, www.ucg.ac.me*, na kojoj su sažeto izloženi i prigodno ilustrovani materijali iz ovog poglavlja.

Pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Koja je, po tvom mišljenju, glavna prekretnica u historiji razvoja telekomunikacija? Obrazloži odgovor.
2. Navedi i opiši ulogu elemenata opšteg modela telekomunikacionog sistema.
3. Opravdaj potrebu za uvođenjem OSI referentnog modela.
4. Da li su tvrdnje koje slijede tačne? Obrazloži odgovor.
 - a) Vještačka inteligencija je zasnovana na internet-stvarima.
 - b) Smanjivanjem veličine audio i video fajlova (kompresija) smanjuje se i vjerovatnoća greške u njihovom prenosu.
 - c) Otvoreni sistem omogućava slobodan pristup različitim komunikacionim servisima.
 - d) Slojeviti protokoli omogućuju realizaciju nižih slojeva nezavisno od viših, i obrnuto.

- 5.* Sistem ima hijerarhiju protokola od sedam slojeva. Aplikacija generiše poruku od 10 bajta. Poruci se u svakom sloju dodaje zaglavlje veličine 1 bajta. Kolika je veličina zaglavlja u bitima, a kolika veličina ukupne poruke u bitima koja se šalje na fizičku liniju za prenos podataka?

Rješenje: Sistem ima sedam slojeva, što znači da se unošenje zaglavlja iste dužine vrši u šest slojeva (enkapsulacija podataka), izuzev fizičkog sloja kojim se poruka prenosi. Ukupna dužina zaglavlja je $6 \cdot 1 \text{ B} = 6 \text{ B} = 6 \cdot 8 \text{ bita} = 48 \text{ bita}$. Ukupna veličina poruke koja se prenosi preko fizičke linije dobija se kada se ukupna veličina zaglavlja sabere sa korisnim podacima: $6 \text{ B} + 10 \text{ B} = 16 \text{ B} = 16 \cdot 8 \text{ bita} = 128 \text{ bita}$. Znači, veličina ukupne poruke koja se prenosi jeste 128 bita, a ukupna veličina zaglavlja 48 bita.

- 6.* Kolika je veličina korisne informacije iz prethodnog zadatka koja se deenkapsulira na sedmom sloju OSI modela za prenos podataka u prijemnom sistemu?

Rješenje: Korisna informacija koja se prenosi iz prethodnog zadatka jeste $10 \text{ B} = 80 \text{ bita}$. Predajni telekomunikacioni sistem prenosi podatak veličine 128 bita sa veličinom zaglavlja od 48 bita. Poslije deenkapsulacije u prijemnom uređaju (računaru), svaki prijemni sloj vrši odbacivanje odgovarajućeg zaglavlja iz prethodnog sloja. Na sedmom sloju odbacuje se prvo utisnuto zaglavlje u predajnom sklopu, tako da na sedmom sloju ostaje korisna informacija veličine od $10 \text{ B} = 80 \text{ bita}$.

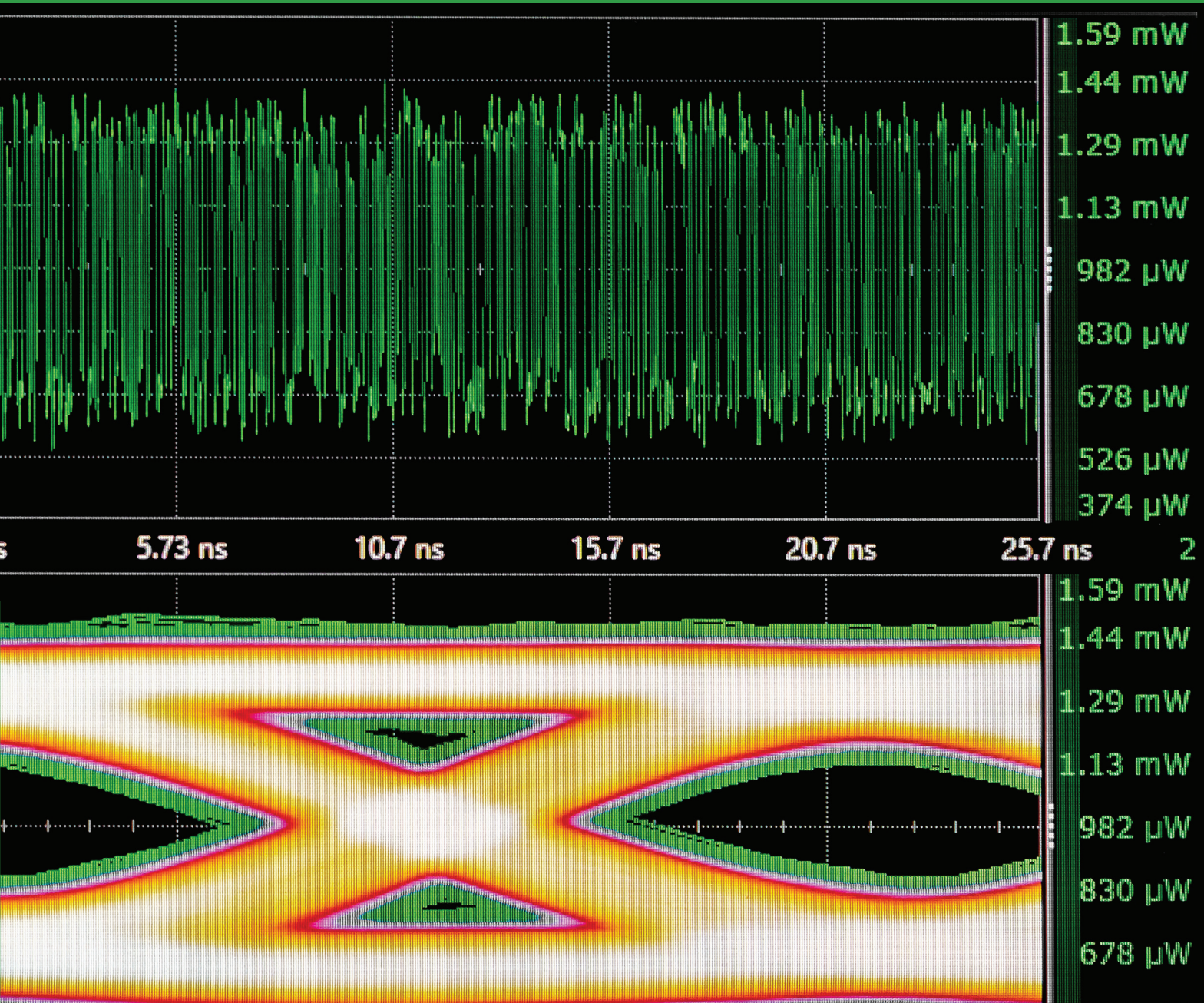
7. Napiši esej do 300 riječi u kojem ćeš dati svoje viđenje poređenja slika 1.9 i 1.10 imajući u vidu razvoj računarskih tehnologija danas.



2. Poruke i signali

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- definišeš pojmove *poruka* i *signal*
- opišeš karakteristike različitih vrsta signala: periodični i aperiodični, analogni i digitalni, slučajni i deterministički
- opišeš vremenske i frekvenijske karakteristike periodičnih i aperiodičnih signala
- razlikuješ analogne i digitalne signale na osnovu njihovih karakteristika
- opišeš značaj slučajnih i determinističkih signala
- nacrtaj vremenski oblik i spektar periodičnog i aperiodičnog signala.



U prethodnom poglavlju upoznali smo se sa modelom telekomunikacionog sistema i pomenuli pojmove *poruka* i *signal*. Poruka (ili informacija) u telekomunikacionim sistemima jedino se može preneti tako što se transformiše u svoj električni ekvivalent – u električni signal. Dakle, signali predstavljaju određene fizičke veličine koje u sebi nose

željenu poruku. Osnovni zadatak u elektronskim komunikacijama jeste preneti poruku u vidu električnog signala do mjesta prijema, pri čemu signal na mjestu prijema mora biti, što je moguće više, sličan originalnom signalu poslanom sa mjesta predaje.

2.1. Vrste signala

U telekomunikacijama, informacije su poruke koje pošiljalac želi prenijeti primaocu. Telekomunikacioni sistem omogućava prenos poruka na daljinu. Poruke se generišu u predajniku, prenose kroz kanal i dolaze do udaljenog prijemnika, gdje se nalazi korisnik poruke.

Podaci koji se prenose sistemom različitog su tipa: govorni, mjerni, podaci o stanju nekog procesa, video-zapisi, fotografije, multimedijalni podaci i slično. Prenos različitih tipova informacija – poruka vrši se električnim signalima. Električni signal predstavlja, na primjer, skup naponskih vrijednosti u različitim vremenskim intervalima. Da bi prenos od predajnika do prijemnika bio uspješan, potrebno je poznavati osobine poruke koja se prenosi, osobine signala koji sadrži takvu poruku, kao i osobine prenosnih puteva (kanala) kojima se poruka prenosi.

Prema kriterijumu nastanka, signali se mogu podijeliti u dvije grupe: prirodne i tehničke. U prirodne signale spadaju govorni, muzički i signali slike, a u tehničke signale ubrajaju se mjerni i računarski signali.

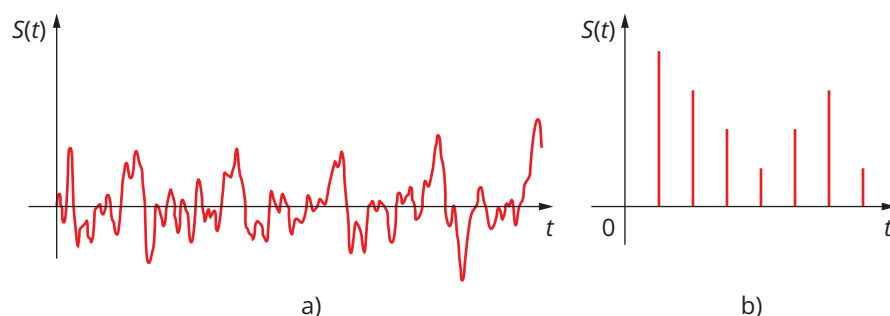
2.1.1. Diskretni i kontinualni signali

Sve poruke koje šalje neki izvor mogu se svrstati u dvije grupe:

(1) **diskretne poruke** – pojavljuju se kao nizovi odvojenih elemenata koji imaju konačan broj različitih vrijednosti. Primjer su poruke koje se prenose u računarskim komunikacijama.

(2) **kontinualne poruke** – opisuju se neprekidnim vremenskim funkcijama. Takve su, na primjer, poruke koje se prenose u telefonskim sistemima ranijih generacija.

Na slici 2.1 prikazane su vremenske funkcije kontinualnih (a) i diskretnih (b) poruka.



Slika 2.1. Primjeri: a) kontinualnih i b) diskretnih poruka

NAPOMENA

Naziv *analogni* potiče od činjenice da posmatrani signal odgovara, odnosno da je analogan fizičkoj pojavi koju predstavlja. Fizičke veličine su kontinualne. Na primjer, zvuk je kontinualna veličina, pa je električni signal na izlazu iz mikrofona analogan jer odgovara kontinualnom talasu na ulazu u mikrofona.

Diskretne i kontinualne poruke mijenjaju se u vremenu, tj. predstavljaju vremenske funkcije. Signali mogu da budu diskretni i kontinualni po vremenu, ali i po svojim vrijednostima, odnosno amplitudama. Ako u posmatranom intervalu vremena signal postoji u svakom trenutku i ako ima bilo koju vrijednost, odnosno ako signal može da ima beskonačan broj različitih trenutnih vrijednosti, onda se kaže da je signal kontinualan i po vremenu i po trenutnim vrijednostima amplituda. Primjer ovakvog signala jeste govorni signal. Kontinualni signali nazivaju se i analogni signali. Analogni signali su kontinualni i po vremenu i po vrijednostima svojih amplituda. Uređaji koji generišu analogne signale i vrše njihovu obradu zovu se analogni uređaji. Na slici 2.1a prikazan je signal kontinualan i po vremenu i po trenutnim vrijednostima amplituda.

Ako signal postoji samo u određenim trenucima vremena i ako ima konačan broj trenutnih vrijednosti, onda se kaže da je signal diskretan i po vremenu i po trenutnim vrijednostima. Ovakvi signali nazivaju se i impulsi, a još češće digitalni signali. Digitalni signali su diskretni po vremenu i po vrijednostima svojih amplituda. Uređaji koji generišu digitalne signale nazivaju se i digitalni uređaji. Primjer takvog uređaja jeste računar. Na slici 2.1b prikazan je signal diskretan i po vremenu i po trenutnim vrijednostima amplituda.

Signali mogu biti kontinualni po vremenu ali i diskretni po trenutnim vrijednostima svojih amplituda, i obrnuto – diskretni po vremenu a kontinualni po trenutnim vrijednostima svojih amplituda.

Kontinualni i diskretni signali međusobno su povezani. Svaki kontinualni signal može se pretvoriti u diskretni, što znači da se može obrađivati i prenositi digitalnim sistemima. Brz razvoj savremenih digitalnih telekomunikacionih sistema posljedica je ove mogućnosti.

2.1.2. Deterministički i slučajni signali

Već smo rekli da u telekomunikacijama informaciju nosi električni signal. U zavisnosti od toga da li se signal može definisati nekom funkcijom koja se može predstaviti u matematičkom obliku, signali se mogu podijeliti u dvije grupe: **deterministički** i **slučajni**. Podjela signala na determinističke i slučajne, predstavlja podjelu signala po svojoj prirodi.

Deterministički signali mogu se definisati funkcijom koja zavisi od vremena, čiji oblik znamo. Pošto tu funkciju poznajemo, onda poznajemo i vrijednost signala u svakom trenutku, pa možemo predvidjeti kako će ona izgledati i u budućem vremenu. Deterministički signal ne nosi poruku. On samo nosi informaciju o svom postojanju i informaciju o načinu na koji se mijenja.

Primjeri determinističkog signala jesu signali sinusnog oblika ili povorke pravougaonih impulsa koji imaju svoju amplitudu, frekvenciju, periodu i početnu fazu. Na slici 2.2a prikazan je vremenski promjenjivi deterministički sinusni signal.

ZANIMLJIVOST

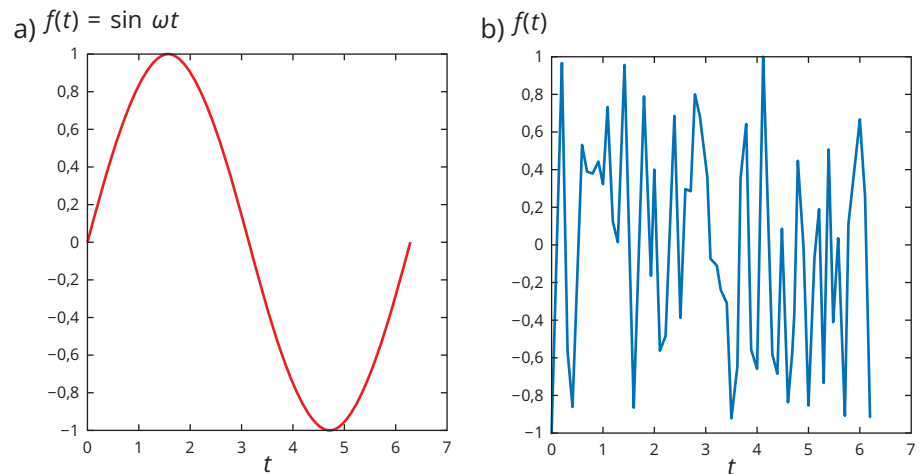
Efekat leptira

Efekat leptira je koncept koji opisuje ideju da čak i najmanje i najmanje predvidljive promjene u početnim uslovima sistema mogu izazvati velike promjene u dugoročnom ponašanju tog sistema. Izraz potiče od metaforičke ideje da leptir koji zamahne krilima na jednom kraju svijeta može pokrenuti lančanu reakciju događaja koja dovodi do velikih posljedica na drugom kraju svijeta. U meteorologiji, efekat leptira sugerše da vrlo mala promjena u atmosferskim uslovima može imati ogroman uticaj na dugoročnu vremensku prognozu. Na primjer, leptir koji zamahne krilima u Brazilu, može pokrenuti niz promjena u atmosferi koje na kraju dovode do formiranja uragana u Atlantskom okeanu.

U stvarnosti, dugoročno ponašanje sistema nije direktno uzrokovano jednim malim događajem, već je rezultat složenih uzajamnih dejstava mnogih faktora i promjena u toku vremena.

Za razliku od determinističkih, vrijednosti slučajnih signala ne mogu se predvidjeti, odnosno ne možemo znati njihove vrijednosti prije nego što se signal generiše. To znači da se ti signali ne mogu opisati matematičkom funkcijom. Trenutne vrijednosti, odnosno amplitude ovakvih signala, slučajnog su karaktera. Zbog toga se trenutna vrijednost slučajnih signala u budućnosti ne može odrediti na osnovu njihovih trenutnih vrijednosti u proteklom intervalu vremena. Ovo je osnovna razlika između slučajnih i determinističkih signala.

Svi telekomunikacioni signali koji nose informaciju jesu slučajni signali. Takvi su signali govora, TV signali ili signali podataka. U slučajne signale spada i termički šum, kao neželjena pojava u prenosu signala. Na slici 2.2b prikazan je slučajan vremenski promjenljivi govorni signal u određenom vremenskom intervalu.



Slika 2.2. Deterministički (a) i slučajni (b) signal

2.1.2.1. Značaj slučajnih i determinističkih signala

Deterministički signali opisuju se vremenskim funkcijama. Kao što u svakom trenutku možemo znati kako izgleda oblik te funkcije, tako u svakom trenutku možemo znati i oblik determinističkog signala. Ako informaciju definišemo kao nešto što rješava neizvjesnost, onda zaključujemo da deterministički signal, koji je definisan u svakom trenutku, pa samim tim ne nosi ništa što je neizvjesno, ne može nositi informaciju. Svi korisni signali u telekomunikacijama po prirodi su slučajni signali. Na primjer, oblik i amplituda govornog signala jesu slučajne veličine. Bitovi, kao signali podataka, iako imaju poznat oblik i amplitudu, predstavljaju slučajne signale, jer je nepoznat njihov raspored.

Iz definicije determinističkog signala mogao bi se izvesti pogrešan zaključak – da ti signali nemaju primjenu u telekomunikacijama, jer opisuju poruke koje se mogu unaprijed tačno predvidjeti. Međutim, deterministički signali i te kako se primjenjuju u telekomunikacijama. Njihova glavna primjena jeste da se koriste kao pomoćni signali za prenos korisnih slučajnih signala.

NAPOMENA

Slučajne signale nije moguće opisati preciznom vremenskom funkcijom, pa se za analizu tih signala koriste statističke metode.

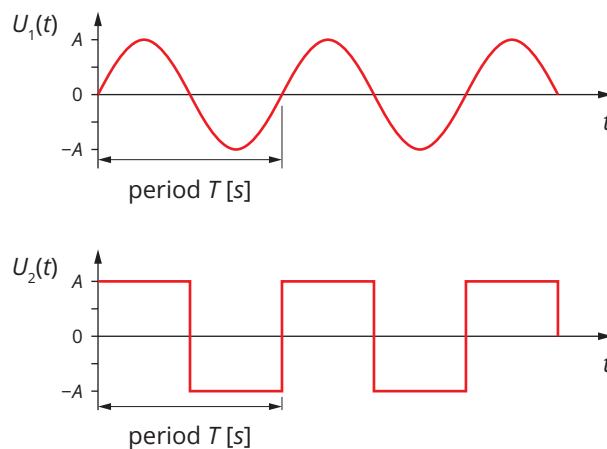
Naime, pošto se mogu definisati matematičkim izrazima, onda se pri obradi korisnih signala, kao i projektovanju sistema koji ih prenose, mogu koristiti matematički postupci.

2.1.3. Periodični i aperiodični signali

Deterministički signali mogu biti periodični i aperiodični. Periodični signali se, za razliku od aperiodičnih, poslije određenog vremena ponavljaju u istom obliku. To vrijeme naziva se **period** ili **perioda** ponavljanja signala. Period ponavljanja signala jeste vrijeme za koje signal napravi jednu oscilaciju; mjeri se u sekundama i označava sa T . Recipročna vrijednost perioda ponavljanja predstavlja **učestanost** ponavljanja (ili **frekvenciju** signala), što predstavlja brzinu ponavljanja signala. Frekvencija signala mjeri se u hercima ($1 \text{ Hz} = 1/\text{sec}$) i računa pomoću formule: $f(\text{Hz}) = 1/T$.

Matematički, periodičan je svaki signal koji zadovoljava uslov: $f(t) = f(t + T)$, gdje je T perioda signala $f(t)$. Perioda ponavljanja ima dimenziju vremena, i mjeri se u sekundama.

Na slici 2.3 prikazani su primjeri periodičnih signala $u_1(t)$ i $u_2(t)$.



Slika 2.3. Primjeri periodičnih signala

Oba signala su periodična sa periodom ponavljanja T . Signali su napravili dvije pune oscilacije, odnosno dvije periode ponavljanja. Ostatak vremena trajanja signala jeste vrijeme koje je jednako polovini periode ponavljanja (T), i to vrijeme zove se poluperioda trajanja signala. Znači, signali su napravili dvije pune i jednu poluperiodu ponavljanja. Prvi periodični signal je sinusna funkcija, čija je maksimalna amplituda A , minimalna amplituda $-A$, perioda ponavljanja $T = 2\pi$, frekvencija $f = 1/T$ i početna faza jednaka nuli. Za vrijeme trajanja jedne periode sinusne funkcije, trenutne vrijednosti funkcije imaju amplitude koje se mijenjaju od 0 do A , što predstavlja maksimalnu

NAPOMENA

Pogledaj odgovarajući sadržaj u Uvodnom poglavlju.

amplitudu sinusne funkcije, zatim opet do 0 i na kraju do $-A$. Iste promjene se ponavljaju i u ostalim periodima signala. Sinusna funkcija je osnovna trigonometrijska funkcija koja se koristi u opisivanju trigonometrijskih odnosa i harmonijskih kretanja.

Drugi periodični signal je pravougaoni signal sa maksimalnom amplitudom A , minimalnom amplitudom $-A$, periodom ponavljanja T i frekvencijom ponavljanja $f = 1/T$. Amplituda signala je konstantna u prvoj poluperiodi signala i jednaka je A , a u drugoj poluperiodi signala amplituda ima vrijednost $-A$. U drugoj periodi vrijednosti amplitude se ponavljaju, i tako redom.

U telekomunikacijama se često koristi funkcija oblika $f(x) = A \sin(\omega x + \varphi)$. Veličina A predstavlja maksimalnu vrijednost, odnosno amplitudu funkcije $f(x)$, $\omega x + \varphi$ predstavlja fazu (ugao) funkcije, veličina ω je kružna frekvencija funkcije $f(x)$, dok veličina φ predstavlja trenutnu devijaciju faze (početnu fazu) funkcije $f(x)$.

Ugao trigonometrijskih funkcija može se zadati u stepenima ili radijanima ($360^\circ = 2\pi$ radijana). Perioda ima dimenziju vremena, i mjeri se u sekundama. Perioda ponavljanja sinusne i kosinusne funkcije je 2π ili 360° .

Primjer 2.1. Na istom grafiku, skiciraj izgled funkcija:

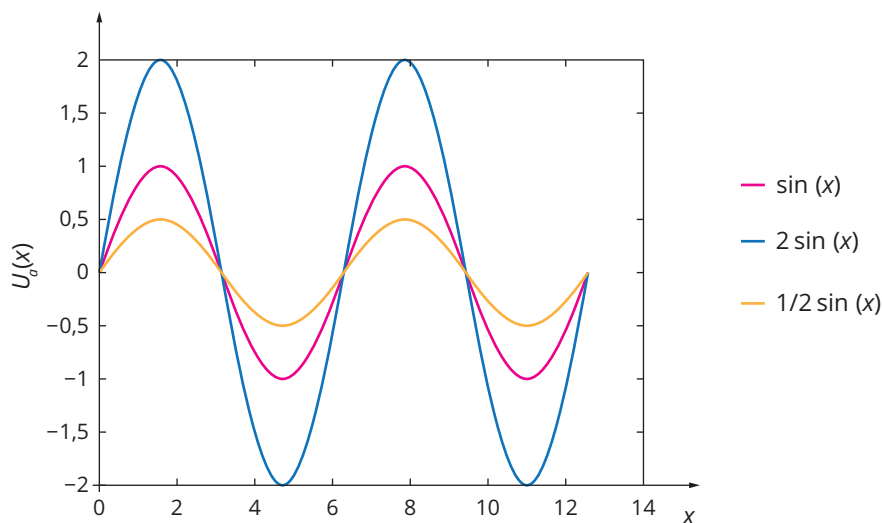
a) $\sin x$, $2 \sin x$, $\frac{1}{2} \sin x$

b) $\sin x$, $\sin 2x$, $\sin \frac{1}{2}x$

c) $\sin x$, $\sin\left(x - \frac{\pi}{6}\right)$, $\sin\left(x + \frac{\pi}{6}\right)$

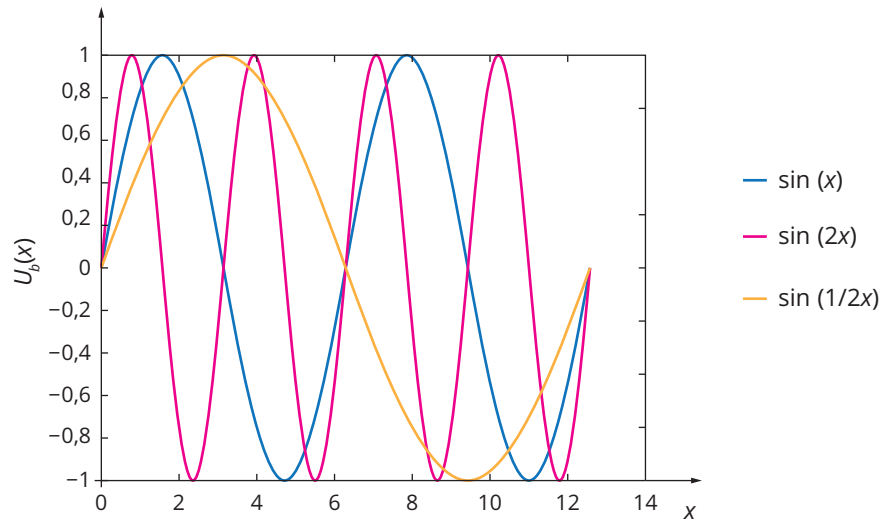
Rješenje:

Funkcije date u primjeru a) imaju istu periodu, frekvenciju i početnu fazu ali se razlikuju po amplitudi. Prva funkcija ima amplitudu 1 V, a druga funkcija ima dva puta veću amplitudu. To znači da će za vrijeme pozitivne i negativne poluperiode vrijednost amplitude biti od 0 V do 2 V, odnosno od 0 V do -2 V. Perioda ponavljanja za sve tri funkcije je: $T = 2\pi = 360^\circ = 2 \cdot 3,14 = 6,28$ rad.



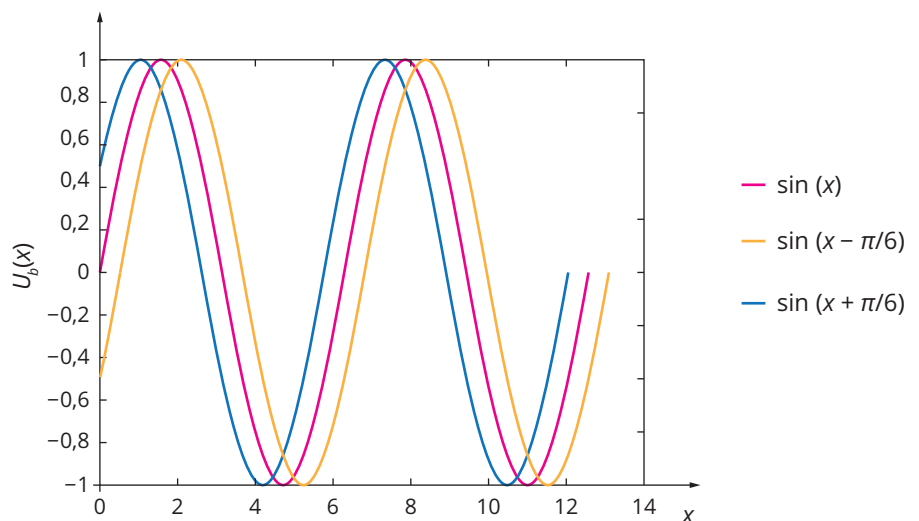
Slika 2.4a. Sinusoide različitih amplituda

Funkcije date u primjeru b) imaju iste amplitude a različite frekvencije i periode ponavljanja. Druga funkcija ima dva puta veću frekvenciju, a to znači da ima dva puta manji period ponavljanja. Treća sinusoida ima četiri puta manju frekvenciju od druge (četiri puta veću periodu ponavljanja) i dva puta manju frekvenciju od prve (dva puta veću periodu ponavljanja).



Slika 2.4b. Sinusoide različitih frekvencija

Funkcije date u primjeru c) imaju iste amplitude i frekvencije, ali se razlikuju po početnim fazama. Druga funkcija je pomjerena udesno za $\pi/6$ u odnosu na prvu funkciju. Treća funkcija pomjerena je ulijevo za isti ugao u odnosu na prvu funkciju.

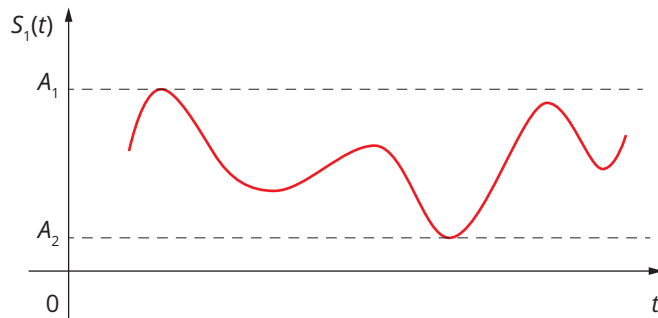


Slika 2.4c. Sinusoide različitih početnih faza

2.1.4. Analogni i digitalni signali

U zavisnosti od tipa poruke, postoje i dvije vrste signala: **analogni** i **digitalni**, a time i dvije vrste sistema za prenos: analogni i digitalni telekomunikacioni sistemi.

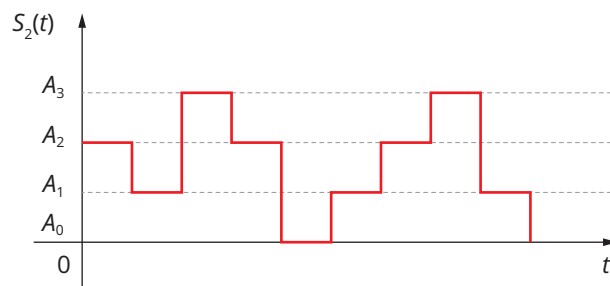
Na slici 2.5 prikazan je signal $S_1(t)$ koji odgovara analognoj poruci. Signal je kontinualan po vremenu i po trenutnim vrijednostima amplituda. Signal nije periodičan, i traje određeno vrijeme. U svakom trenutku tog vremena, analogni signal ima svoju amplitudu, čija je vrijednost definisana iz unaprijed određenog skupa (neograničenog) vrijednosti. Broj vrijednosti koje iz unaprijed definisanog skupa može uzeti analogni signal, praktično je neograničen. Analogni signali su električno predstavljanje signala prisutnih u prirodi – kao što su zvuk, svjetlost, temperatura, vazdušni pritisak itd.



Slika 2.5. Signal koji odgovara analognoj poruci

Primjeri analognih sistema koji se koriste u telekomunikacijama jesu sistemi za prenos i obradu radio-signala, telefonskog signala i video-signala.

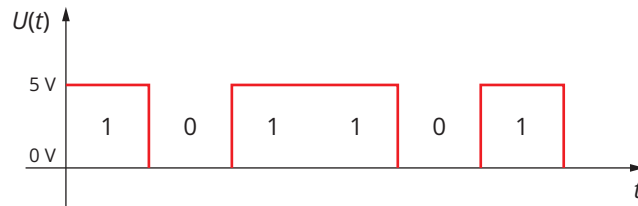
Digitalni sistemi služe za prenos signala koji predstavljaju diskretne vrijednosti. Broj vrijednosti napona koje iz unaprijed definisanog skupa može uzeti digitalni signal, ograničen je. Ako je broj vrijednosti naponskih nivoa u opštem slučaju M , onda govorimo o M -arnom signalu. Na slici 2.6 broj vrijednosti koje uzima digitalni signal $S_2(t)$ jeste četiri ($M = 4$) (A_0, A_1, A_2 i A_3).



Slika 2.6. Digitalni signal sa četiri naponska nivoa

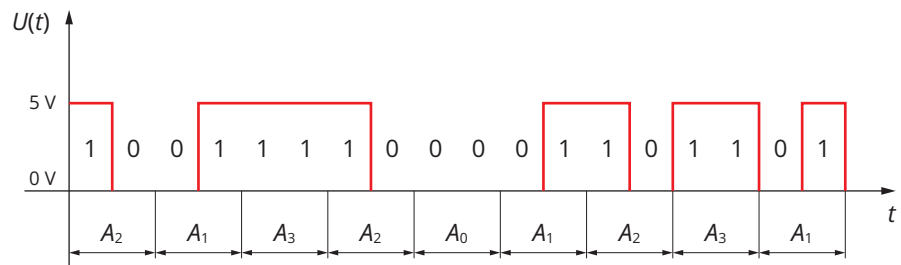
Digitalni signal na slici 2.6 diskretan je po trenutnim vrijednostima napona, ali je kontinualan po vremenu. Može se reći da ako u posmatranom intervalu vremenski signal postoji u svakom trenutku, ali ima samo konačan broj trenutnih vrijednosti, onda je signal kontinualan po vremenu a diskretan po trenutnim vrijednostima. Svaka trenutna vrijednost signala može se predstaviti odgovarajućim simbolom, odnosno signal se može kodirati.

Ako je broj naponskih nivoa jednak dva, onda govorimo o **binarnom** signalu (slika 2.7).



Slika 2.7. Binarni digitalni signal

Signal sa slike 2.6 takođe se može prikazati u binarnom obliku tako što se svaka od četiri vrijednosti predstavi sa dvije cifre (kombinacija 00 = A_0 , 01 = A_1 , 10 = A_2 i 11 = A_3) (slika 2.8).

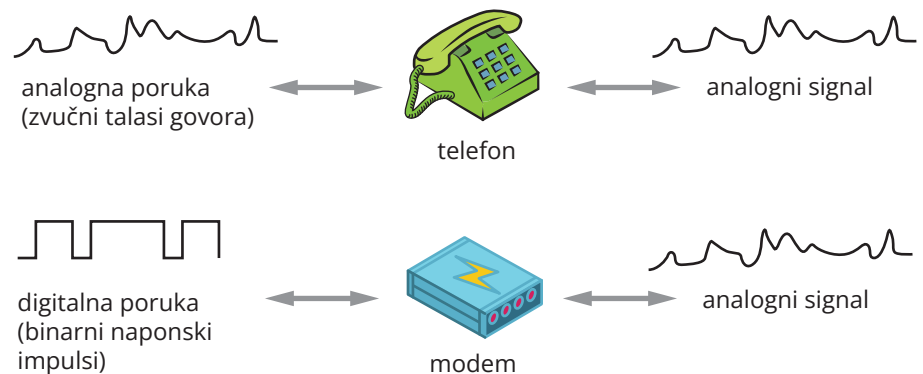


Slika 2.8. Diskretni signal sa slike 2.6, predstavljen kao binarni digitalni signal

Analogni signali koji se javljaju u prirodi, obrađuju se u analognim uređajima i prenose analognim telekomunikacionim sistemima. Analogni sistemi mogu da prenose i digitalne podatke. Digitalni signali mogu se prenositi i analognim sistemima tako što se prvo pretvore u analogni oblik. Uređaji koji obavljaju ovu funkciju zovu se *digitalno-analogni pretvarači signala* ili *D/A konvertori*.

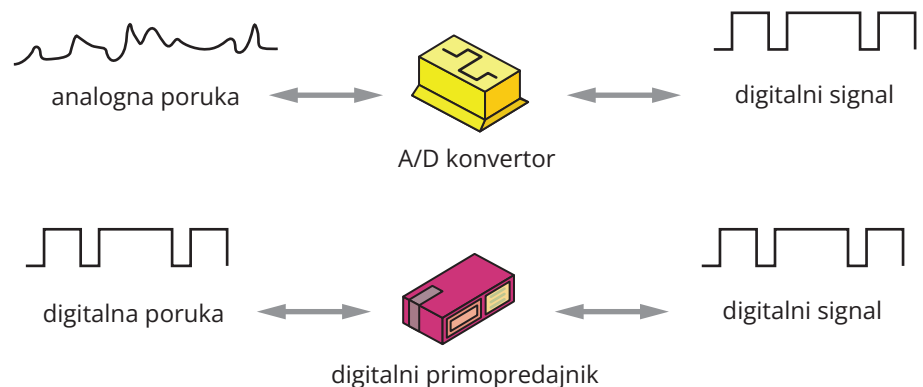
Digitalni signali obrađuju se u digitalnim uređajima i prenose digitalnim telekomunikacionim sistemima. Digitalni sistemi mogu da prenose i analogne podatke. Digitalni signali predstavljaju poruke nizom binarnih pravougaonih naponskih impulsa. Da bi se digitalnim sistemom prenio analogni signal, on se mora pretvoriti u digitalni oblik. Uređaji koji analogni signal pretvaraju u digitalni oblik zovu se *analogno-digitalni pretvarači* ili *A/D konvertori*.

Na primjer, klasičnim telefonskim vodom mogu da se prenose analogni signali. Zbog toga, u slučaju da se telefonskim vodom prenose podaci koje generiše računar, digitalni podaci iz računara moraju se pretvoriti u analogni signal. Modem je primjer uređaja koji vrši konverziju digitalnih u analogne signale, kao i obrnutu konverziju – pretvaranje analognih u digitalne signala. Na slici 2.9 prikazan je prenos analogne i digitalne poruke analognim sistemom. U slučaju kada se prenosi analogni signal, nije potrebna konverzija signala, a ako se digitalni signal prenosi analognim sistemom za prenos, digitalni signal prvo se mora pretvoriti u analogni (uz pomoć modema), pa onda prenijeti.



Slika 2.9. Prenos analognim sistemom: a) analogne poruke, b) digitalne poruke

Na slici 2.10 prikazan je prenos analogne i digitalne poruke digitalnim sistemom za prenos podataka. U slučaju kada se prenosi digitalni signal, nije potrebna konverzija signala; a kada se prenosi analogni signal digitalnim sistemom za prenos, analogni signal prvo se mora pretvoriti u digitalni signal (uz pomoć AD konvertora), pa onda prenijeti.

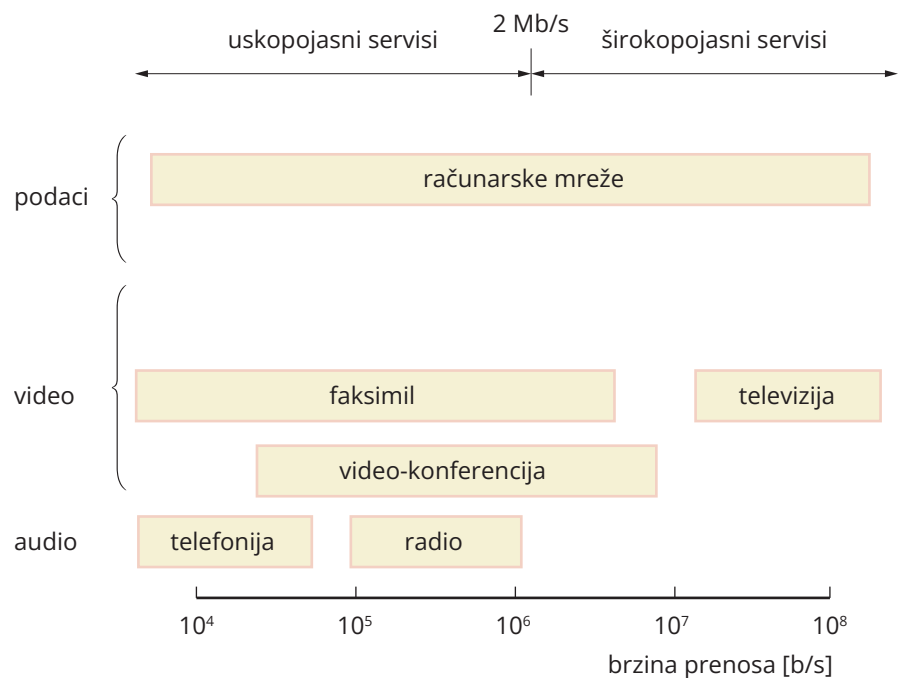


Slika 2.10. Prenos digitalnim sistemom: a) analogne poruke, b) digitalne poruke

Napomenimo da su govor i pokretna slika prirodno analogni signali, koji se korišćenjem odgovarajućih postupaka mogu pretvoriti u digitalne. Ako se digitalizuju, signali govora i video-poruke mogu se takođe smatrati podacima.

U telekomunikacijama postoje tri glavne vrste poruka koje se prenose: govor, video i podaci. Primjeri sistema koji prenose govor (audio) jesu telefonija i radio. Primjer sistema koji prenosi sliku (video) jesu televizija i video-konferencija. Podatke generišu računari, i oni se obično prenose računarskim mrežama.

Na slici 2.11. prikazane su tri glavne vrste digitalizovanih poruka i njihove brzine prenosa.



Slika 2.11. Tipovi i izvori poruka

Telekomunikacioni servisi sa brzinama ispod 2 Mb/s u literaturi se često nazivaju uskopojasnim (*narrowband*), dok se servisi sa brzinama iznad 2 Mb/s nazivaju širokopojasnim (*broadband*). Na slici 2.11 može se vidjeti da računarske mreže, usljed različitih brzina prenosa podataka, mogu biti i uskopojasni i širokopojasni sistemi – servisi za prenos podataka. Telekomunikacioni sistemi za prenos govora spadaju u uskopojasne sisteme za prenos podataka, a sistemi za prenos TV signala (govor i slika) spadaju u širokopojasne sisteme za prenos podataka.

2.2. Vremenske i frekvencijske karakteristike periodičnih i aperiodičnih signala

Svi signali u telekomunikacijama mogu se posmatrati na dva načina potpuno ravnopravno – u vremenskom i frekvencijskom obliku. Matematički je dokazano da se svaki signal koji se može opisati funkcijom koja zavisi od vremena, može predstaviti i u funkciji frekvencije. Ako je signal u vremenskom obliku, onda se njegova amplituda mijenja u funkciji vremena, periodično ili aperiodično. Signal u frekvencijskom obliku predstavlja prikaz komponenti signala od kojih se on sastoji, na odgovarajućim frekvencijama. U telekomunikacijama se pri analizi prenosa i obrade signala često koriste frekvencijski oblici signala i njihove karakteristike.



Žan Batist Furije (1768–1839), francuski matematičar i fizičar. Najpoznatiji je po istraživanju redova i njihovoj primjeni na probleme prenosa toplote i vibracija, koji su po njemu nazvani Furijeovi redovi ili Furijeove transformacije.

Još 1822. godine francuski matematičar Žan Furije (1768–1830) pokazao je da se svaka složena periodična funkcija može predstaviti u obliku algebarske sume niza sinusnih i kosinusnih – **harmonijskih** funkcija. Amplitude funkcija tog niza imaju različite vrijednosti, a kružne učestanosti jednake su cjelobrojnom umnošku osnovne kružne učestanosti. Osnovna kružna učestanost naziva se i kružna učestanost prvog harmonika. Amplitude i faze pojedinih članova ovog niza izračunavaju se složenim matematičkim postupkom, koji se naziva Furijeova analiza. Furijeova analiza ima izuzetno velik značaj u tehnici, posebno u telekomunikacijama.

Kao što smo ranije definisali, opšti oblik sinusnog periodičnog signala je:

$$u(t) = A \sin(2 \cdot \pi f t + \varphi),$$

gdje su: $u(t)$ matematički zapis vremenske periodične funkcije, A amplituda, f učestanost (frekvencija) signala, t vrijeme i φ početna faza signala. Izraz $2\pi \cdot f$ predstavlja kružnu učestanost (frekvenciju) signala, i ona je: $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Na osnovu Furijeove analize, svaka složena periodična neprekidna funkcija $x(t)$ može da se predstavi algebarskim zbirom:

$$x(t) = A_0 + A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \cos 2\omega_0 t + A_3 \cos 3\omega_0 t + \dots \\ + B_1 \sin \omega_0 t + B_2 \sin 2\omega_0 t + B_3 \sin 3\omega_0 t + \dots \quad (2.1)$$

gdje su $A_0, A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, B_3, \dots$ konstante.

Za parnu funkciju, tj. funkciju koja zadržava svoj znak pri promjeni znaka argumenta:

$$x(-t) = x(t),$$

svi koeficijenti B_0, B_1, \dots, B_n jednaki su nuli, pa imamo da je

$$x(t) = A_0 + A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \cos 2\omega_0 t + A_3 \cos 3\omega_0 t + \dots \quad (2.2)$$

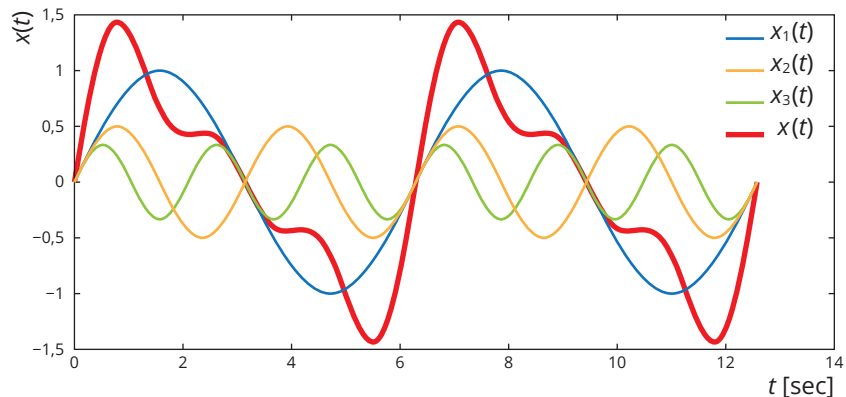
Za neparnu funkciju, tj. funkciju koja mijenja znak pri promjeni znaka argumenta:

$$x(-t) = -x(t),$$

svi koeficijenti A_0, A_1, \dots, A_n jednaki su nuli, pa imamo da je

$$x(t) = B_1 \sin \omega_0 t + B_2 \sin 2\omega_0 t + B_3 \sin 3\omega_0 t + \dots \quad (2.3)$$

U opštem slučaju, svaka periodična funkcija može da se predstavi kao zbir harmonijskih (sinusnih) funkcija različitih amplituda, čije su kružne učestanosti $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots$



Slika 2.12. Složena periodična funkcija nastala slaganjem tri harmonijske funkcije

Na slici 2.12 debljom (crvenom) linijom predstavljena je složena (neharmoijska) periodična funkcija $x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)$, koja nastaje slaganjem tri harmonijske funkcije čije amplitude stoje u odnosu 1 : 1/2 : 1/3, a učestanosti u odnosu 1 : 2 : 3.

Rezultujuća složena funkcija može se predstaviti kao algebarski zbir:

$$x = x_0 \sin \omega_0 t + \frac{x_0}{2} \sin 2\omega_0 t + \frac{x_0}{3} \sin 3\omega_0 t \quad (2.4)$$

Prvi član na desnoj strani jednačine (2.4) predstavlja osnovno oscilovanje sa kružnom učestanošću (ω_0), i naziva se **osnovni harmonik**. Drugi član prestavlja harmonijsko oscilovanje sa dvostrukom kružnom učestanošću ($2\omega_0$), i naziva se **drugi harmonik**. Treći član sa trostrukom kružnom učestanošću ($3\omega_0$) predstavlja **treći harmonik**.

Harmonijska oscilovanja koja se opisuju sinusnom ili kosinusnom funkcijom, čije učestanosti prema učestanošći osnovnog oscilovanja stoje u odnosu cijelih brojeva, nazivaju se **viši harmonici**.

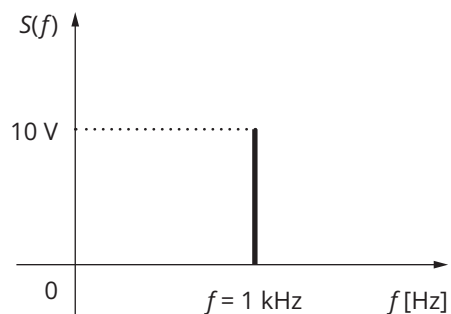
Razvijanje periodičnih funkcija kojima se opisuje složeno oscilovanje u trigonometrijski niz, naziva se **harmonijska analiza**.

Ako se složena funkcija (kao što je npr. povorka pravougaonih impulsa) ne može napisati kao zbir konačnog broja harmonika, onda se uzimanjem većeg broja članova trigonometrijskog niza, odnosno viših harmonika, tačnije prikazuje složena funkcija.

Broj komponenti kojima se opisuje složeni signal veoma je velik. Skup konačnog broja harmonika koji ulazi u sastav datog složenog oscilovanja naziva se **harmonijski spektar**. Spektar se grafički predstavlja tako što se na x-osu nanose učestanosti koje u tim tačkama imaju ordinate jednake amplitudama tog oscilovanja. Spektar signala predstavlja funkcija učestanosti, i označavaćemo ga sa $S(f)$. Spektar složenog signala može biti diskretan i kontinualan. Ako je spektar diskretan, on se sastoji od više spektralnih komponenti. Ako je spektar signala kontinualan, njegove se učestanosti kontinualno mijenjaju.

Spektar jedne sinusne funkcije ima samo jednu spektralnu komponentu, i to na učestanosti oscilovanja (f). Spektralna komponenta prikazuje se tako što se na učestanost oscilovanja nacrtaju normalna na frekvencijsku osu, čija dužina odgovara amplitudi oscilovanja u toj tački. Spektralna komponenta crta se samo u pozitivnom dijelu, jer u tom dijelu nosi snagu signala.

Radi ilustracije, na slici 2.13 prikazan je spektar sinusne funkcije, amplitude 10 V, čija je frekvencija 1 kHz ($s(t) = 10 \sin(2\pi t \cdot 1000)$).



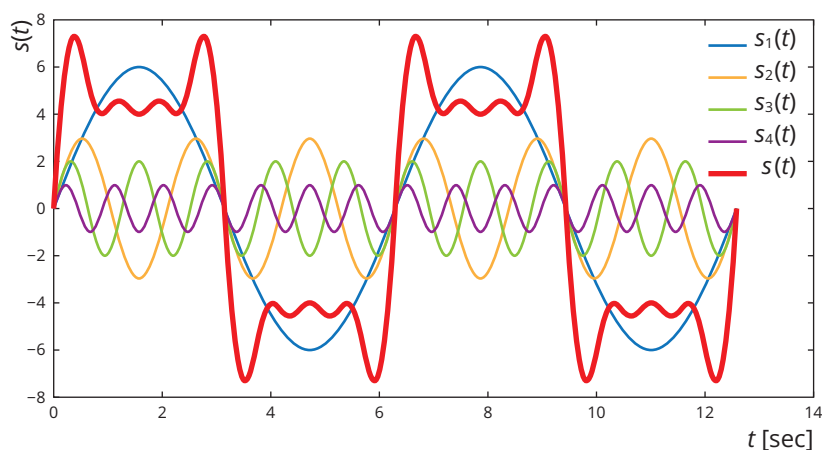
Slika 2.13. Spektar sinusne funkcije, frekvencije $f = 1$ kHz

Ako se signal sastoji od zbira dva sinusna signala, onda spektar signala ima dvije spektralne komponente, na učestanostima oscilovanja jedne i druge sinusne funkcije.

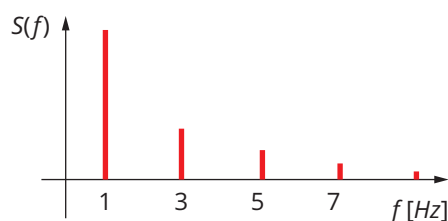
Spektar signala je harmonijski ako je rastojanje između spektralnih komponenti – harmonika isto i jednako osnovnom harmoniku. Spektar je neharmonijski ako je razmak između spektralnih komponenti različit. Svaka spektralna komponenta nosi dio snage signala, tako da je ukupna snaga signala koji se prenosi jednaka zbiru snaga svih njegovih komponenti.

Na slici 2.14a prikazan je vremenski oblik složene funkcije (zadebljana crvena linija) – binarnog signala, koji se sastoji od četiri sinusne komponente različitih amplituda sa učestanostima 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz i 7 Hz, dok je na slici

2.14b prikazan odgovarajući harmonijski spektar složene funkcije, koja je dobijena sabiranjem četiri sinusne funkcije. Binarni signal je izobličen, jer se sastoji od samo četiri sinusne funkcije.



a)



b)

Slika 2.14. Vremenski oblik složene funkcije dobijene sabiranjem četiri sinusne funkcije (a), spektar složene funkcije u domenu učestanosti (b)

Sabiranjem dovoljnog broja sinusoida određene amplitude i učestanosti moguće je formirati bilo koji periodični signal. Binarni signal, prikazan na slici 2.14, može da se kreira sabiranjem (superponiranjem) velikog broja sinusoida različitih amplituda i učestanosti. Što se iskoristi veći broj sinusoida, to će se dobiti oblik vjerniji originalu.

Na slici 2.14a prikazan je način na koji se signal mijenja u vremenu, ili kako se to kaže: prikazan je signal u **vremenskom domenu**.

Na slici 2.14b prikazan je način na koji se signal mijenja po vrijednostima učestanosti svojih komponenti, ili kako se kaže: prikazan je signal u **domenu učestanosti**.

Signali se prenose nekim medijumom, pri čemu se u vremenu mijenja neko njegovo električno svojstvo, npr. napon ili jačina struje. Harmonijska analiza ima za cilj da prikaže signal u domenu učestanosti. Signal se u domenu učestanosti predstavlja svojim frekvencijskim komponentama – harmoničima, od kojih svaki ima odgovarajuću snagu. Dakle, komponente signala u domenu učestanosti međusobno se razlikuju po učestanosti i po snazi.

Poznavanjem spektra signala može se odrediti energija svakog harmonika složenog signala, a samim tim i energija složenog signala.

VEZA SA PRAKSOM

Grafičko prikazivanje sadržaja audio-signala na muzičkom uređaju

Pretpostavimo da slušamo muziku na kvalitetnoj muzičkoj liniji, čiji je izgled prikazan na slici 2.15.

Frekvencijski sadržaj audio-signala koji trenutno slušamo grafički se prikazuje na displeju muzičkog uređaja, u obliku pravougaonika koji mijenjaju veličinu u ritmu muzike (u lijevom uglu uređaja na slici). Niske učestanosti odgovaraju dubokim tonovima (basovi), dok visoke učestanosti odgovaraju visokim tonovima. Slušalac može da podešava tonove po svom ukusu, regulišući nivoe signala u različitim frekvencijskim opsezima uz pomoć preklopnika prikazanih na desnom dijelu uređaja sa slike. Podešavanjem ovih nivoa, pojačavamo ili slabimo

odgovarajuće frekvencijske komponente, odnosno harmonike složenog muzičkog signala, muzike koju slušamo.



Slika 2.15. Grafičko prikazivanje sadržaja audio-signala na muzičkom uređaju

2.2.1. Vremenski oblik i spektar periodičnih i aperiodičnih signala

Rekli smo da se svaki složeni signal može predstaviti u vremenskom i frekvencijskom domenu. Nekada je potrebno da se zna oblik signala u vremenu, a nekada da se zna njegov spektar. Kombinujući sinusiode različitih amplituda, faza i učestanosti, može se predstaviti bilo koji periodični signal sa nekoliko harmonika. Harmonijska analiza, čiji je cilj da prikaže signale u domenu učestanosti, zasniva se na teoriji Furijeovih redova i Furijeovih transformacija. Furijeova analiza omogućava predstavljanje signala u frekvencijskom domenu. Rekli smo takođe da skup svih frekvencijskih komponenti signala čini njegov spektar. Značaj pretvaranja signala iz vremenskog u frekvencijski domen je u činjenici da se neke važne osobine signala – kao što su slabljenje, brzina prostiranja, izobličenja u prenosu – mogu bolje prikazivati i tumačiti u frekvencijskom nego u vremenskom domenu. Nekim od ovih primjena bavićemo se nešto kasnije.

Osnovna uloga harmonijske analize jeste da se vremenska funkcija, koja opisuje signal, pomoću pogodno izabranih parametara predstavi u domenu učestanosti kako bi se omogućilo matematičko praćenje prenosa signala telekomunikacionim sistemima. Na taj način stvaraju se uslovi za utvrđivanje kvaliteta telekomunikacionog sistema kojim se prenose informacije.

Furijeova analiza koristi složeni matematički aparat. Zbog toga se za harmonijsku analizu signala koriste odgovarajući računarski programi. Jedan od najčešće korišćenih jeste **MATLAB**. To je softverski alat za predstavljanje i analizu funkcija i signala. Naziv je nastao kao skraćenica od engleskih riječi MATrix LABoratory (matrična laboratorija). Prva verzija MATLAB-a kreirana je krajem 1970. godine na američkom Univerzitetu Stanford. Značaj MATLAB-a u tome je što se pomoću njega mogu na jednostavan način predstavljati veoma kompleksne funkcije i pratiti njihovo ponašanje. Softverski paketi u sklopu MATLAB-a koriste se i za prikazivanje informacija u obliku signala, kao i za simulaciju funkcija važnih sa stanovišta prenosa u telekomunikacionim sistemima. MATLAB nije besplatan softverski alat, već se za njegovo korišćenje plaćaju naknade.

Za matematička izračunavanja, crtanje grafika funkcija, simulaciju vremenskih oblika i spektara signala i sl. na internetu se može naći velik broj besplatnih alata, tj. alata otvorenih kodova (open source).

Scilab je numerički računarski alat i numerički programski jezik koji se može koristiti za obradu signala, statističku analizu, obradu slike, računске proračune. Scilab predstavlja zamjenu otvorenog koda za MATLAB. Ta dva alata su slična, tako da osoba koja zna da koristi jedan od njih, jednostavno može preći na korišćenje drugog. Za razliku od MATLAB-a, koji je relativno skup naučni alat, Scilab je potpuno besplatan.

Octave je još jedan važan matematički alat, veoma pogodan za inženjerske proračune. Octave je, uz Scilab, vrlo moćna alternativa otvorenog koda za MATLAB. Ona je, što se tiče sintakse, odnosno pisanja naredbi, u znatnoj mjeri kompatibilnija sa MATLAB-om nego Scilab.

Maxima je matematički alat koji se široko koristi u oblastima matematike kao što su algebra, numerička analiza, viša matematika, crtanje funkcija.

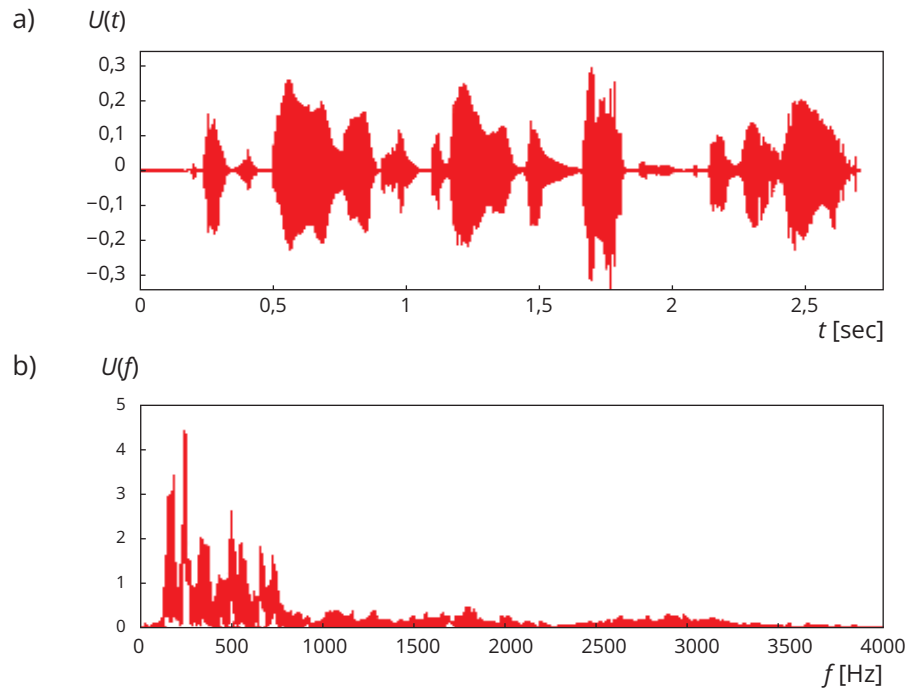
SageMath je matematički alat koji ima široku upotrebu u različitim oblastima matematike (algebra, kombinatorika, teorija grafova, numerička analiza, teorija brojeva, račun, statistika itd.). To je besplatan alat otvorenog koda, i konkurent je mnogim drugim matematičkim alatima – kao što su Maple, Matematika, MATLAB – za čije se korišćenje plaćaju licence.

Svi navedeni alati predstavljaju besplatne softvere otvorenog koda, prilagođene radu na velikom broju platformi, odnosno operativnih sistema, kao što su UNIX, Linux, Windows, Android, MacOS itd.

2.2.1.1. Vremenski oblik i spektar aperiodičnih signala

Aperiodični su signali koji nemaju periodu ponavljanja. Aperiodični signali mogu biti analogni i digitalni. Primjer aperiodičnog analognog signala jeste govorni signal, a aperiodičnog digitalnog signala – računarski podatak koji se sastoji od velikog broja nula i jedinica.

Radi ilustracije, na slici 2.16 prikazano je kako izgleda jedan aperiodičan signal, signal govora u vremenskom obliku i u domenu učestanosti.



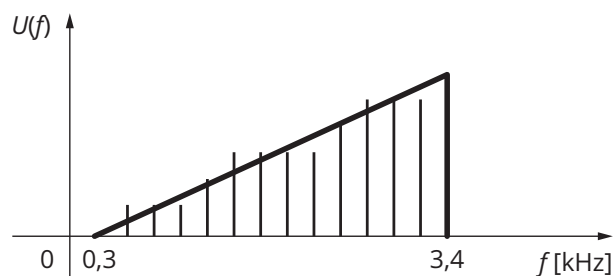
NAPOMENA

U praksi se često uzima da je širina opsega telefonskog signala 4 kHz.

Slika 2.16. Signali govora u: a) vremenskom i b) domenu učestanosti

Sa slika se vidi da se učestanosti govornog signala nalaze u opsegu od 0 do 3,4 kHz. Dakle, harmonici govornog signala, koji nose informaciju, nalaze se u navedenom opsegu.

Spektar govornog signala se, iz praktičnih razloga, grafički predstavlja kao na slici 2.17.



Slika 2.17. Spektar govornog signala

Na slici 2.17 prikazan je spektar slučajnog govornog signala, kao promjena amplitude govornog signala u funkciji učestanosti. Govorni signal sastoji se od velikog broja različitih amplituda. Amplitude govornog signala veće su ako je učestanost veća. Zato se spektar govornog signala uprošćeno predstavlja u obliku pravouglog trougla. Gledano teorijski, svi signali poruka imaju beskonačno širok spektar, ali se u praksi uzima da signali poruka imaju spektre ograničene širine. Na primjer, kao što smo već vidjeli na slici 2.16b, u opsegu od 300 Hz do 3,4 kHz nalaze se sve značajne komponente koje su dovoljne za prenos govornog signala. Ova spektralna širina uzeta je kao međunarodni standard za širinu kanala za prenos govora telefonom. Spektar govornog signala je diskretan, harmonijski i ograničen od donje (300 Hz) do gornje (3,4 kHz) granične frekvencije.

ZANIMLJIVOST

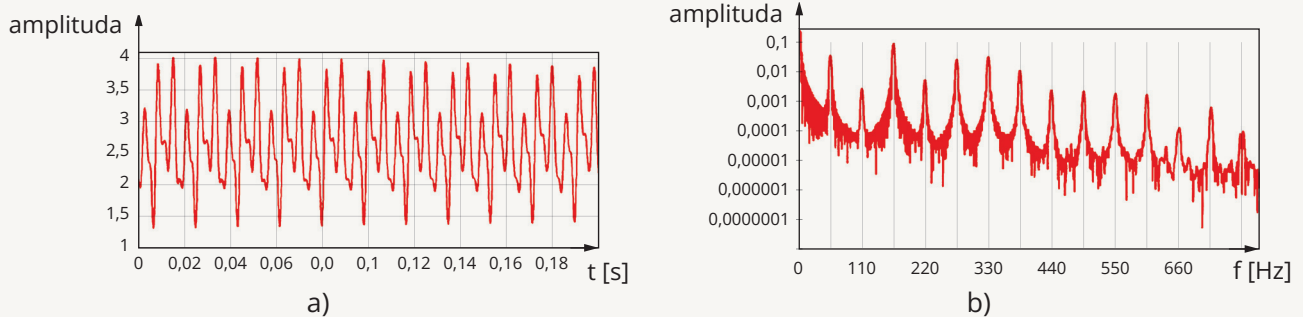
Boja glasa zavisi od učestanosti. Kako govor sadrži i komponente učestanosti iznad 4 kHz, a telefonski kanal ograničen je na 4 kHz, onda se učestanosti više od ove ne

moгу prenositi telefonskim sistemom. Zbog toga se glas istog čovjeka uživo i glas preko telefona razlikuju.

VEZA SA PRAKSOM

Muzički instrumenti daju zvukove odgovarajućih učestanosti – tonova. Određivanje koje su komponente učestanosti prisutne u muzičkoj noti, može se izvesti izračunavanjem Furijeove transformacije date muzičke note. Na osnovu dobijenih podataka može se generisati isti zvuk, uključivanjem frekvencijskih komponenti koje su dobijene Furijeovom analizom. Primjer takvog uređaja jeste sintesajzer. Sintesajzer je muzički instrument koji vještačkim, sintetičkim putem proizvodi razne zvukove.

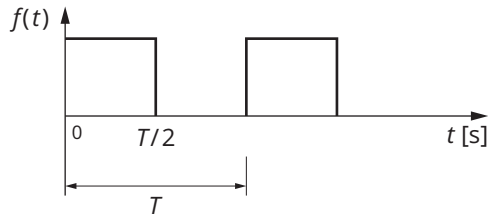
Bas-gitara je muzički instrument koji, zbog debljih žica, daje dublje tonove (basove) u odnosu na klasičnu gitaru, čiji su tonovi viši. Na slici 2.18a prikazani su vremenski i frekvencijski oblik zvuka bas-gitare. Slika 2.18b jasno pokazuje oscilatorne komponente signala.



Slika 2.18. Zvuk bas-gitare: a) vremenski oblik, b) spektar signala zvuka dobijen Furijeovom transformacijom

2.2.1.2. Vremenski oblik i spektar periodičnih signala

Periodični su signali koji se ponavljaju sa periodom T . Na slici 2.19 prikazan je vremenski oblik periodične povorke pravougaonih impulsa. U prvoj polovini periode pravougaonog impulsa prenosi se napon (U), na primjer 5 V; a u drugoj polovini periode ne prenosi se napon (0 V). Prenošnje i neprenošnje napona traje isto vrijeme, polovinu periode ponavljanja. Za takve impulse kaže se da su *kvadratni pravougaoni impulsi*. Ovakav signal može poslužiti za predstavljanje cifara 0 i 1.



Slika 2.19. Periodični signal, povorka pravougaonih impulsa

NAPOMENA

Neprenošnje svih spektralnih komponenti nekog signala ima za posljedicu njegovo slabljenje i izobličenje. Da bi se to svelo na prihvatljivu mjeru, sistemi za prenos signala projektuju se da prenose određen (dovoljan) broj njegovih spektralnih komponenti.

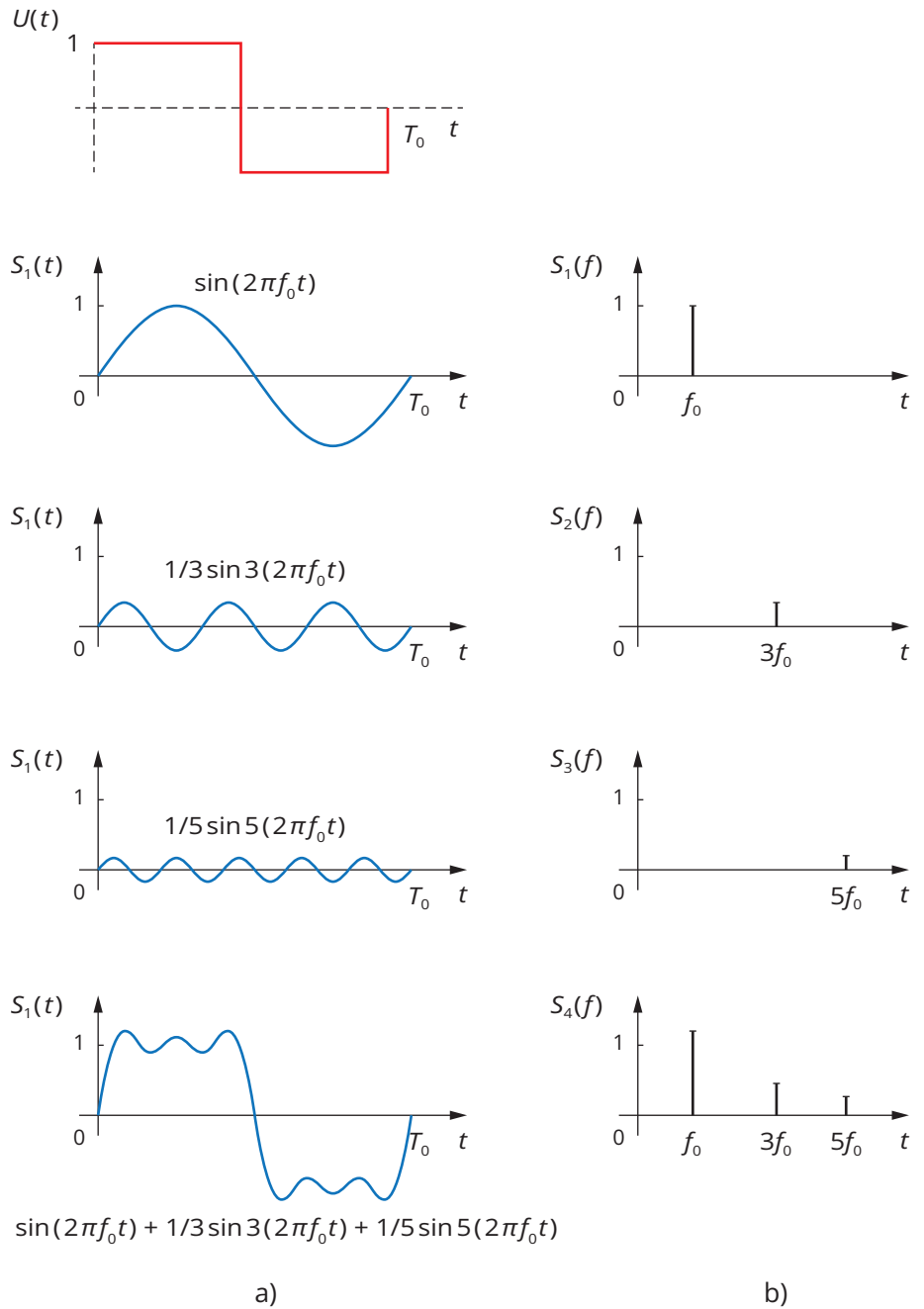
Povorka periodičnih pravougaonih impulsa jeste signal koji se u telekomunikacijama najčešće koristi za prenos podataka. Matematičkim putem pokazuje se da se pravougaoni impuls može dobiti sabiranjem velikog broja sinusoida male amplitude, čije su frekvencije umnošci osnovne frekvencije. To znači da je spektar povorke pravougaonog impulsa beskonačno širok, jer se sastoji od beskonačnog broja spektralnih komponenti. U praksi ne postoji telekomunikacioni sistem koji prenosi signal beskonačne širine spektra. Zato se za prenos pravougaonog signala koristi konačan broj spektralnih komponenti.

Primjer 2.2. Nacrtati spektar složenog signala, koji se sastoji od tri harmonika na frekvencijama f_0 , $3f_0$ i $5f_0$, ako su amplitude (redom) 1, $1/3$ i $1/5$. Napisati izraze za sve tri spektralne komponente kao i vremenski oblik signala koji je sastavljen od navedenih komponenti. Analizirati vremenski oblik dobijenog zbirnog signala.

Rješenje: Na slici 2.20 prikazane su komponente zadatog binarnog signala 10, koji se šalje na liniju veze telekomunikacionog sistema. Na prve tri slike, na lijevoj strani, prikazani su talasni oblici prve tri vremenske komponente zadatog periodičnog signala. One se razlikuju po amplitudi i frekvenciji. Prvi signal ima osnovnu frekvenciju f_0 , drugi $3f_0$ i treći $5f_0$. Na desnoj strani slike prikazani su njihovi odgovarajući harmonici. Četvrta slika prikazuje izgled signala dobijenog sabiranjem njegove prve tri komponente (lijeva strana), odnosno njegove harmonike (desna strana). Dobijeni složeni signal sa tri harmonika liči na binarni signal 10. Daljim dodavanjem komponenti viših harmonika, složeni signal će sve više ličiti binarnom periodičnom signalu 10. Na slikama su dati izrazi za vremenske komponente sva tri signala. Ukupan signal dobija se sabiranjem sva tri signala:

$$u(t) = 1 \cdot \sin(2\pi f_0 t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3 \cdot (2\pi f_0 t)) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5 \cdot (2\pi f_0 t))$$

Dakle, signal pri prenosu treba posmatrati kao zbir ili – kako se to kaže – kao superpoziciju harmonika različitih učestanosti i različitih amplituda. Početne faze sinusnih funkcija su 0° , što znači da nemaju fazni pomak.

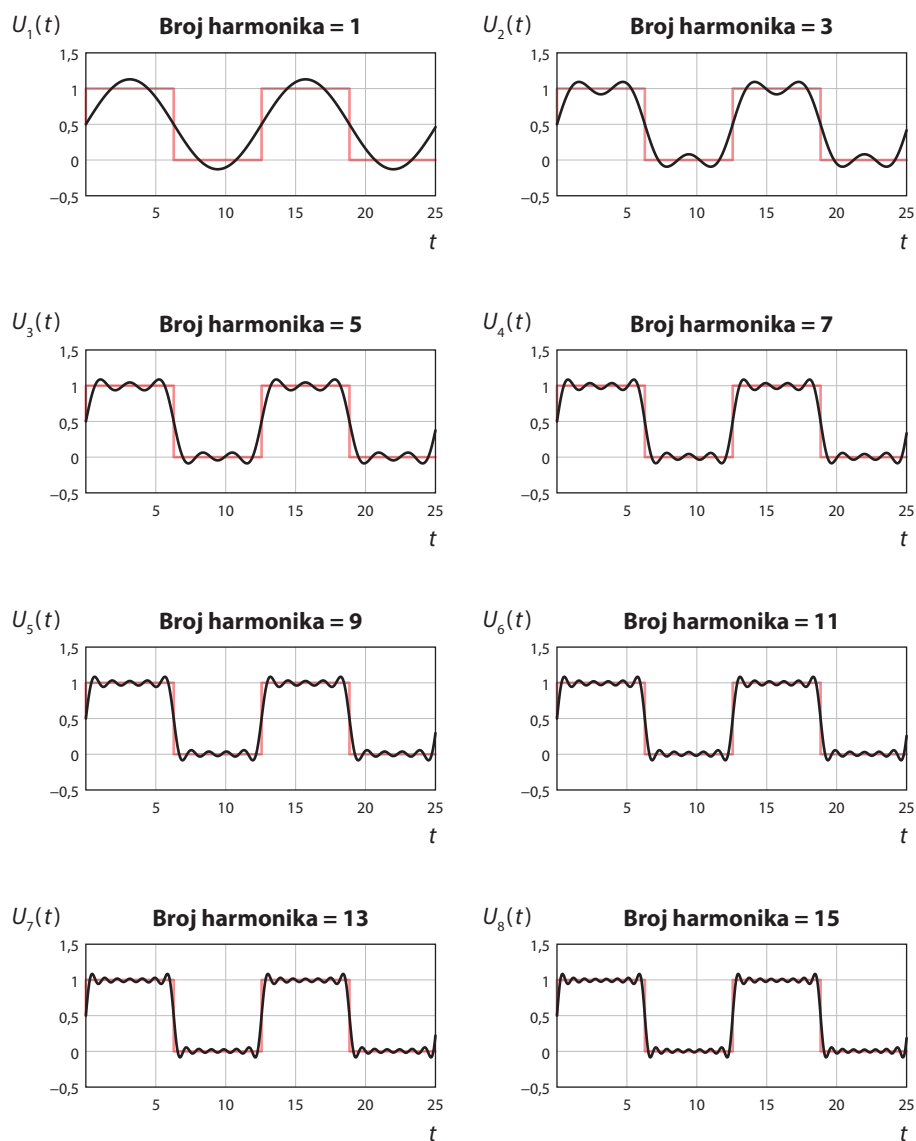


Slika 2.20. Komponente složenog signala sa tri spektralne komponente: a) vremenski oblici, b) harmonici

Primjer 2.3.

Prikazati vremenski oblik zadatog periodičnog pravougaonog signala 1010, u zavisnosti od broja njegovih spektralnih komponenti.

Rješenje: Spektar niza pravougaonih impulsa sastoji se od beskonačnog broja spektralnih komponenti – harmonika. Što je veći broj harmonika, signal je sličniji pravougaonom signalu. Ako je mali broj harmonika, signal je izobličen. Na slici 2.21 prikazan je oblik digitalnog signala 1010 ako se njegov spektar sastoji od jednog harmonika, odnosno jedne sinusne funkcije, čija je frekvencija f_0 . Ako signal ima tri harmonika, onda se signal sastoji od zbira tri sinusne funkcije, čije su frekvencije: f_0 , $2f_0$ i $3f_0$. Signal koji ima pet harmonika sastoji se od zbira pet sinusoida, čije su frekvencije: f_0 , $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ i $5f_0$. U zadnjem slučaju, signal se sastoji od zbira 15 sinusoida, čije su spektralne komponente na frekvencijama: f_0 , $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$, $6f_0$, $7f_0$, $8f_0$, $9f_0$, $10f_0$, $11f_0$, $12f_0$, $13f_0$, $14f_0$ i $15f_0$. Na istim slikama prikazan je i zadati idealan digitalni signal. Povećanjem broja harmonika dobijamo signal koji sve više liči originalnom. Za velik broj harmonika, razlika se praktično ne može uočiti.



Slika 2.21. Uticaj broja harmonika na izgled pravougaonog periodičnog signala

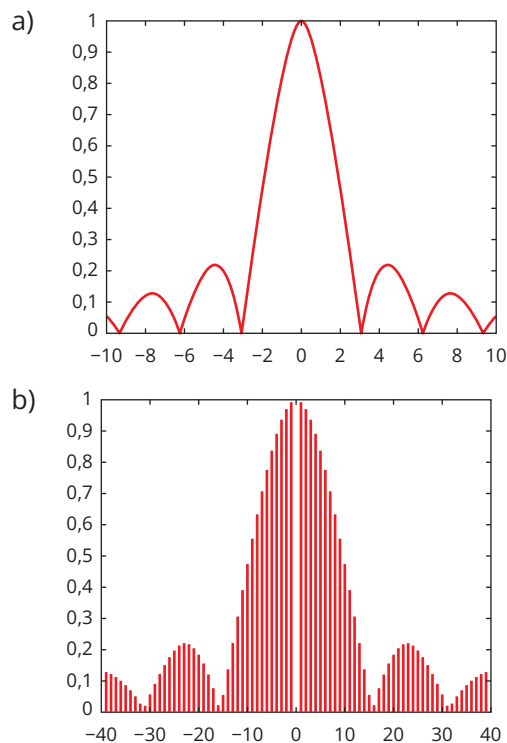
2.2.1.2.1. Spektar pravougaonog signala

Iz navedenih primjera vidjeli smo da povećanjem broja harmonika dobijamo signal koji sve više liči originalnom. Iz ovoga se može izvući važan zaključak:

Širi propusni opseg sistema za prenos signala omogućuje prenos većeg broja njegovih harmonika, a samim tim i veću vjernost signala originalu.

Ako je trajanje signala kraće, širina spektra mu je veća. I obrnuto, ako je trajanje signala duže, širina spektra mu je manja. To znači da trajanje signala u vremenu i širina spektra signala stoje u obrnuto proporcionalnom odnosu.

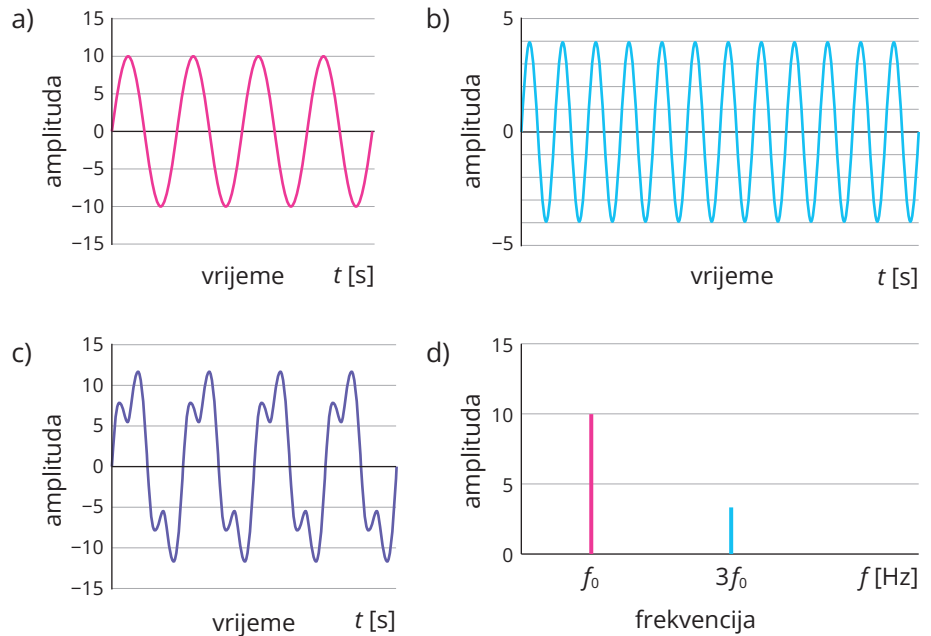
Kao što smo ranije napomenuli, svaki periodični i aperiodični signal može se opisati kao zbir velikog broja sinusnih komponenti određene amplitude, frekvencije i početne faze. Teorijski, broj tih komponenti je beskonačno velik. Ako frekvencije tih komponenti stoje u nekom odnosu, onda je njegov spektar diskretan i harmonijski. Ako to nije slučaj, onda se frekvencije kontinualno mijenjaju, pa je takav spektar kontinualan. Kontinualan spektar odgovara jednom pravougaonom impulsu, a diskretan harmonijski spektar odgovara nizu pravougaonih impulsa koji mijenjaju svoju periodu. Brzina promjene takvog periodičnog signala jeste frekvencija prvog harmonika spektra. Na slici 2.22 prikazan je spektar jednog pravougaonog impulsa i niza periodičnih pravougaonih impulsa.



Slika 2.22. Kontinualan i diskretan spektar: a) jednog pravougaonog impulsa, b) niza pravougaonih impulsa

Primjer 2.4. Prikazati vremenski i spektralni oblik složenog signala koji se sastoji od dvije spektralne sinusne komponente, čije su amplitude 10 i 4, a učestanost druge komponente je tri puta veća od učestanosti prve.

Na slikama 2.23 a) i b) prikazana su dva signala različitih učestanosti i različitih amplituda. Njihov zbir, prikazan na slici c), takođe je periodični signal. Izgled spektra signala prikazan je na slici d).



Slika 2.23. Složena periodična funkcija, u vremenskom i spektralnom domenu, koja je nastala sabiranjem dviju sinusnih funkcija

Na slici 2.23a prikazana je periodična sinusna funkcija učestanosti f_0 , $f_1(t) = 10 \sin(2\pi f_0 t)$, a na slici 2.23b sinusna funkcija tri puta veće učestanosti $3 \cdot f_0$, $f_2(t) = 4 \sin(2\pi \cdot 3f_0 t)$. Na slici 2.23c prikazana je periodična složena funkcija koja je jednaka zbiru $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$. Na slici 2.23d prikazan je spektar sa dvije spektralne komponente, složenog zbirnog signala. Spektar složenog signala je diskretan, harmonijski i ima dvije spektralne komponente na frekvenciji f_0 i $3f_0$. ■

Rezime

- ▶ Poruke koje šalje neki izvor poruka mogu se svrstati u dvije grupe: (1) diskretne poruke – koje se pojavljuju kao nizovi posebnih elemenata sa konačnim brojem stanja, kao što su poruke koje se prenose u računarskim komunikacijama i (2) kontinualne poruke – koje se javljaju kao funkcije vremena i koje imaju sve moguće vrijednosti stanja definisanih u odgovarajućim granicama. Električni ekvivalenti poruka koje se prenose kroz telekomunikacioni sistem, nazivaju se signali.
- ▶ Signali mogu biti deterministički i slučajni. Deterministički signali mogu se definisati funkcijom koja zavisi od vremena, čiji oblik znamo. Vrijednosti slučajnih signala ne mogu se predviđeti, i ne možemo znati njihove vrijednosti prije nego što se signal generiše. Takvi su skoro svi telekomunikacioni signali.
- ▶ Deterministički signali mogu biti periodični i aperiodični. Periodični signali se, za razliku od aperiodičnih, ponavljaju u istom obliku poslije određenog vremena. Ovo vrijeme naziva se period. Recipročna vrijednost perioda predstavlja učestanost ponavljanja ili frekvenciju signala.
- ▶ U zavisnosti od tipa poruke, postoje i dvije vrste signala: analogni i digitalni, a time i dvije vrste sistema za prenos: analogni i digitalni telekomunikacioni sistemi. Analogni sistemi koriste električne signale koji se kontinualno mijenjaju u vremenu. Digitalni sistemi koriste električne signale koji predstavljaju diskretne vrijednosti. Broj vrijednosti koje digitalni signal može uzeti iz unaprijed definisanog skupa, ograničen je. Ako je taj broj jednak dva, onda govorimo o binarnom signalu. Digitalni signali ne javljaju se u prirodi, pa se zbog toga u telekomunikacionim sistemima moraju pretvoriti u digitalni oblik.
- ▶ Razvijanje periodičnih funkcija kojima se opisuju složeno oscilovanje u trigonometrijski niz, naziva se harmonijska analiza. Skup harmonijskih oscilovanja koji ulazi u sastav datog složenog oscilovanja, naziva se harmonijski spektar.
- ▶ Signali se mogu ravnopravno predstaviti po vremenu i frekvenciji. Načini na koji se signali mijenjaju u vremenu, prikazuju se graficima signala u vremenskom domenu. Vrijednost njihovih učestanosti prikazuju se funkcijama u frekvencijskom domenu.
- ▶ Harmonijska analiza ima za cilj da prikaže signal u domenu učestanosti. Signal se u frekvencijskom domenu predstavlja svojim frekvencijskim komponentama, harmonicima, od kojih svaki ima odgovarajuću snagu. Harmonijska analiza, čiji je cilj da prikaže signale u domenu učestanosti, zasniva se na teoriji Furijeovih redova i Furijeove transformacije.

Manje poznate riječi

kontinualan – neprekidan; diskretan – odvojen, poseban; determinisati – odrediti, ograničiti; harmonija

– sklad djelova jedne cjeline; domen – oblast, područje; kompatibilan – podudaran, usklađen.

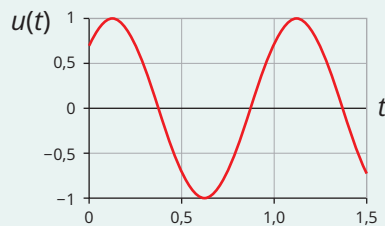
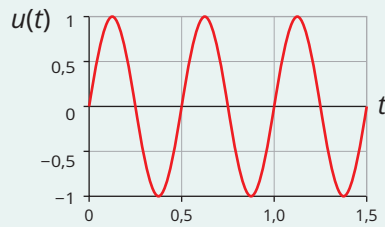
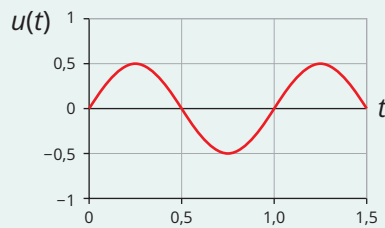
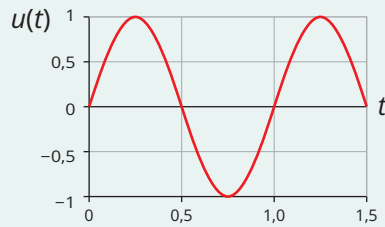
Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko želiš da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga: *S. Stojanović: Osnovi telekomunikacija, Građevinska knjiga, Beograd, 1977.* Ta obimna knjiga uvela je u svijet telekomunikacija skoro sve današnje inženjere iz zemalja bivše Jugoslavije. Osim te knjige, korisno je da

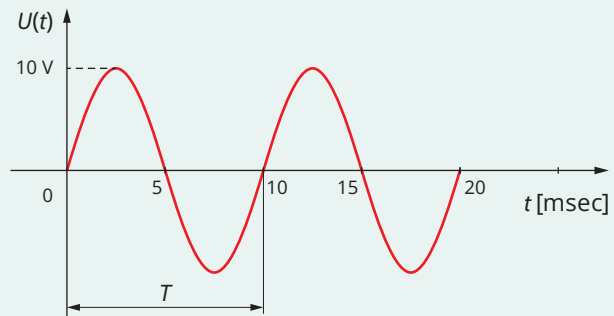
pristupiš veb-stranicama Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici – *I. Radusinović, E. Kočan, S. Tomović: Osnovi telekomunikacija, www.ucg.ac.me, i E. Kočan, U. Urošević i S. Tomović: Osnovi telekomunikacija, www.ucg.ac.me, na kojima su sažeto izloženi i prigodno ilustrovani materijali iz ovog poglavlja.*

Pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Navedi i opiši svojstva različitih vrsta signala.
2. Objasni razliku između determinističkih i slučajnih signala.
3. Napiši analitičke izraze za četiri periodične sinusne funkcije čiji su vremenski oblici prikazani na sljedećim slikama.



- 4.* Na slici je prikazana sinusna funkcija. Nacrtaj njen spektar.

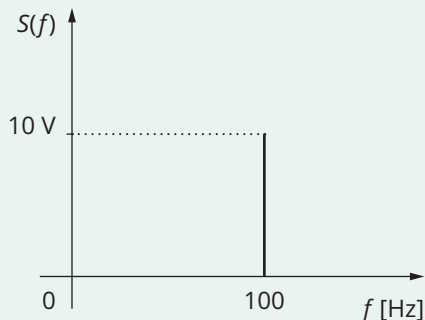


Rješenje:

Sa slike se vidi da perioda sinusne funkcije, odnosno vrijeme za koje ona napravi jednu oscilaciju, iznosi $T = 10$ msec. Frekvencija signala računa se kao recipročna vrijednost periode ponavljanja:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \text{ msec}} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3} \text{ sec}} = 0,1 \cdot 10^3 \text{ Hz} = 100 \text{ Hz}.$$

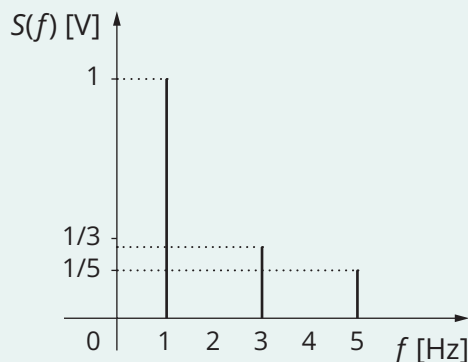
Spektar jedne sinusne funkcije jeste jedna spektralna komponenta na frekvenciji $f = 100$ Hz (slika).



- 5.* Prikaži zbir tri spektralne komponente periodičnog pravougaonog signala:

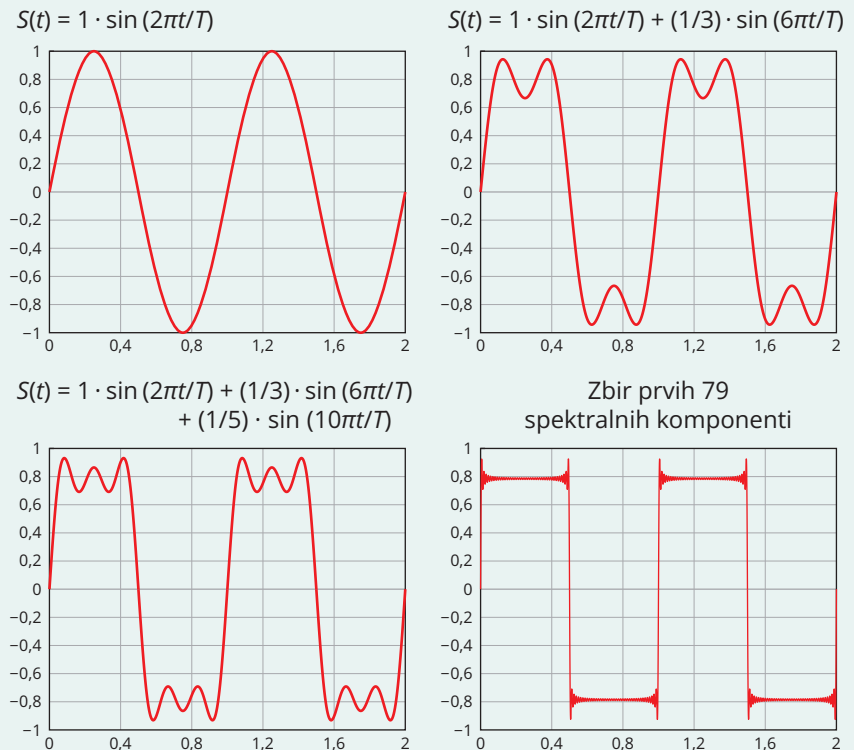
$$\begin{aligned} S_1(t) &= 1 \cdot \sin(2\pi t/T), \\ S_2(t) &= 1/3 \cdot \sin(6\pi t/T) \text{ i} \\ S_3(t) &= 1/5 \cdot \sin(10\pi t/T). \end{aligned}$$

Rješenje: Svaki periodični signal može se predstaviti kao zbir velikog broja sinusnih funkcija. Tri komponente periodičnog pravougaonog impulsa jesu sinusne funkcije različitih amplituda i frekvencija. Frekvencije signala su f , $3f$ i $5f$. Prva komponenta je osnovni harmonik, jer su ostale komponente, to jest njihove frekvencije, umnošci frekvencije osnovnog harmonika. Amplitude su (redom) 1 V, 1/3 V i 1/5 V. Spektar zbirnog signala ima tri spektralne komponente, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



- 6.* Pronađi na internetu primjer koji ilustruje kako izobličenje periodičnog pravougaonog impulsa zavisi od broja njegovih spektralnih komponenti.

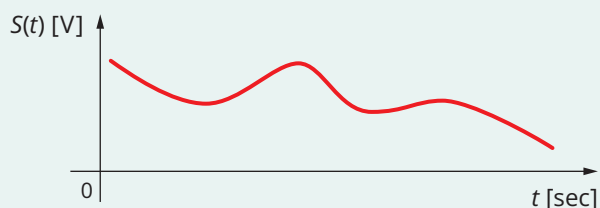
Rješenje: Na sljedećoj slici prikazano je kako izobličenje periodičnog pravougaonog impulsa zavisi od broja njegovih spektralnih komponenti.



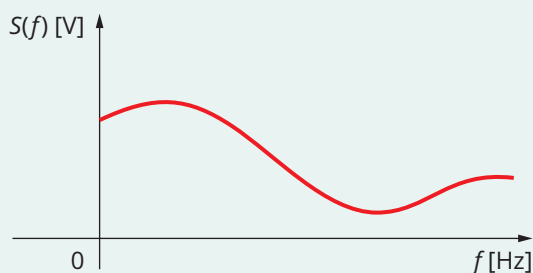
Sa slike se vidi da što je veći broj spektralnih komponenti, periodični pravougaoni signal sličniji je početnom signalu. Pravougaoni periodični signal sa jednom spektralnom komponentom jeste sinusna funkcija, i ne liči na pravougaoni signal. Signal koji predstavlja zbir dvije sinusne funkcije pomalo liči na pravougaoni periodični signal, a sa tri komponente zbirni signal više liči na periodični pravougaoni impuls. Sa 79 spektralnih komponenti signal je gotovo istovjetan periodičnom pravougaonom signalu.

- 7.* Skiciraj vremenski oblik proizvoljnog kontinualnog signala čiji je spektar ograničen graničnom frekvencijom, kao i kontinualni spektar proizvoljnog aperiodičnog signala.

Rješenje: Kontinualni signal u posmatranom vremenskom intervalu postoji u svakom trenutku, bez naglih skokova. Signal je neprekidan od svog početka trajanja (slika).

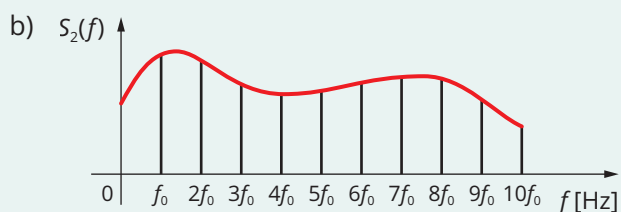
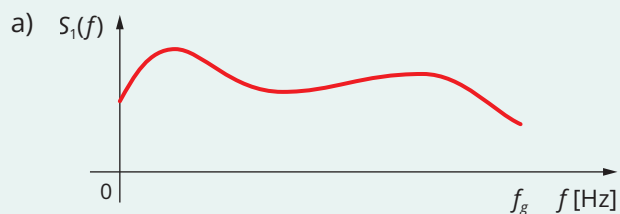


Spektar aperiodičnog signala je kontinualan, ima neograničen broj spektralnih komponenti čija se frekvencija kontinualno mijenja (slika).



Oba signala su kontinualna, ali se razlikuju njihove promjene. Prvi signal ima promjenu amplituda po vremenu a drugi promjenu amplituda po frekvenciji, što predstavlja kontinualni spektar signala.

8. Objasni razliku između spektara signala $S_1(f)$ i $S_2(f)$ na sljedećim slikama a) i b):



Rješenje: Spektar signala na prvoj slici je kontinualan, u granicama od 0 Hz do granične frekvencije f_g , čije se učestanosti kontinualno mijenjaju. Spektar na slici a) jeste amplitudski spektar aperiodičnog proizvoljnog signala. Na slici b) prikazan je spektar jednog periodičnog signala. Spektar je diskretan, sa 10 spektralnih komponenti čije učestanosti stoje u određenom odnosu, to jest umnošci su osnovne učestanosti f_0 . Zbog toga je spektar signala na slici b) diskretan harmonijski spektar. Amplitude ovog diskretnog spektra mijenjaju se u funkciji kontinualnog spektra sa slike a).



3. Uticaj sistema na prenos signala

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš karakteristike sistema za prenos signala
- razlikuješ karakteristike idealnog i realnog sistema za prenos signala
- opišeš razlike između prenosa signala linearnim i nelinearnim sistemom
- opišeš uzroke izobličenja signala pri prenosu
- opišeš uticaj različitih vrsta šumova na prenos signala
- opišeš ulogu i vrste filtara
- proračunaš karakteristične parametre zadatog filtra.



Kada se govori o prenosu signala, sistemi za prenos signala označavaju skup svih uređaja u nekoj cjelini koji omogućuju da se bilo kakve poruke prenesu električnim putem, u obliku signala, sa jednog mjesta na drugo. Svaki sistem za prenos signala može se raščlaniti na dva dijela: uređaji za prenos i spojni put. Uređaji za prenos predstavljaju skup električnih sklopova u kojima se vrši obrada signala sa ciljem da se učine što pogodnijim za prenos. Spojni put predstavlja medijum kroz koji se signal prostire.

Sistemi za prenos imaju svojstva (karakteristike) koja utiču na signale koje prenose. Cilj je da karakteristike sistema za prenos budu takve da što je moguće manje oslabe signal i da ga što je moguće vjernije prenesu, odnosno da ga što manje izobličavaju.

Uticaj sistema za prenos na prenos signala, tema je ovog poglavlja. Poseban dio poglavlja odnosi se na sklopove koji se nazivaju električni filtri. U telekomunikacijama, glavni zadatak filtera jeste izdvajanje određenih signala iz mnoštva signala koji se prenose sistemom.

3.1. Sistemi za prenos signala

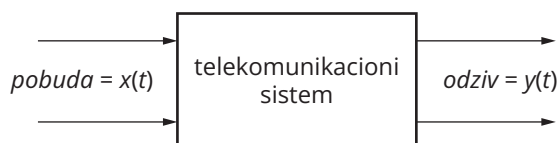
3.1.1. Karakteristike sistema za prenos signala

NAPOMENA

Pokazuje se da ako je poznat odziv telekomunikacione mreže na sinusoidalne pobude različitih učestanosti, tada se odziv te iste mreže na bilo koji drugi pobudni signal može jednoznačno odrediti. Za determinističke signale, periodične i aperiodične, proučavanje njihovog prenosa svodi se u suštini na poznavanje odziva mreže na sinusoidalnu pobudu.

Telekomunikacioni sistemi sastavljeni su od sklopova. Svaki od sklopova predstavlja zasebnu cjelinu koja obavlja odgovarajuću funkciju. Za svaki se mogu odrediti dva kraja koja predstavljaju ulaz i dva kraja koja predstavljaju izlaz iz sklopa. Dakle, svaki sklop može se smatrati električnom mrežom sa dva para krajeva, mrežom sa četiri izvoda, odnosno mrežom sa četiri pola. Električna kola sa četiri izvoda nazivaju se **četvoropoli**. Niz ovakvih sklopova, čije su funkcije različite, a koji su vezani u red jedan na drugi, to jest kaskadno, obrazuju sistem za prenos. Da bi se obavio prenos poruke, ona se prvo mora formirati, a zatim predstaviti skupom konačnih simbola. Dalje, takvu poruku potrebno je prenijeti na daljinu bez greške, te je na kraju primiti i razumjeti. Navedene obrade vrše zasebni sklopovi. Broj sklopova u sistemu za prenos signala zavisi od vrste signala i načina njegove obrade. Zadatak svakog telekomunikacionog sistema jeste da primljeni signal bude što sličniji signalu koji se prenosi, tj. da bude što vjerniji originalu.

Signal se tokom prenosa mijenja. Te promjene utvrđuju se na osnovu upoređivanja signala na ulazu u sistem – **signala pobude** (pobuda) sa signalom na izlazu iz sistema – **odzivom signala** (odziv) (slika 3.1), tj. nalaženjem međusobnog odnosa odziva i pobude sistema.

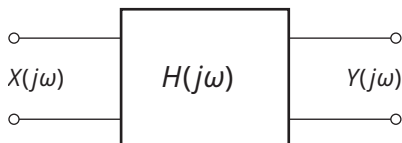


Slika 3.1. Pobuda i odziv u telekomunikacionom sistemu

3.1.1.1. Funkcija prenosa

Funkcija prenosa izražava matematički odnos između izlaznog i ulaznog signala nekog sistema. Znajući ulazni signal u sistem i funkciju prenosa, može se odrediti izlazni signal.

Funkcija prenosa definiše se u domenu učestanosti. Da bi se funkcija prenosa definisala u domenu učestanosti, moraju se vremenske funkcije pobude i odziva sistema pretvoriti u funkcije učestanosti. Koristeći odgovarajuće matematičke transformacije, takve vremenske funkcije transformišu se u domen učestanosti, odnosno u odgovarajuće kompleksne oblike. To znači da se pobuda $x(t)$ i odziv $y(t)$ transformišu u svoje kompleksne ekvivalente



Slika 3.2. Kompleksni ekvivalenti pobude, prenosne funkcije i odziva u telekomunikacionom sistemu

NAPOMENA

Iz uvodnog dijela udžbenika obnovi kompleksne brojeve i kola naizmjenične struje.

$X(j\omega)$ i $Y(j\omega)$, dok se funkcija prenosa predstavlja u kompleksnom obliku $H(j\omega)$ kao količnik odziva i pobude sistema (slika 3.2). U kompletnim oblicima, j predstavlja imaginarnu jedinicu a ω kružnu učestanost.

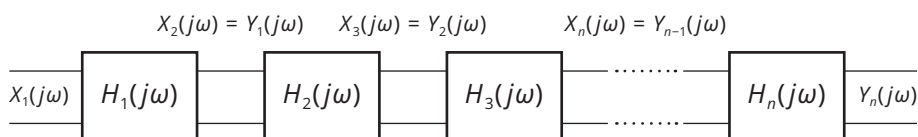
Funkcija prenosa telekomunikacionog sistema u kompleksnom obliku sa prethodne slike jeste:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (3.1),$$

pa je odziv telekomunikacionog sistema:

$$Y(j\omega) = H(j\omega) \cdot X(j\omega) \quad (3.2).$$

Već je rečeno da je telekomunikacioni sistem sastavljen od više sklopova. Ti sklopovi, različiti po namjeni, imaju i različite funkcije prenosa. Sklopovi su vezani serijski (kaskadno) i čine sistem za prenos podataka. Kompletan sistem za prenos podataka može se zamijeniti jednim četvoropolom, za koji se može definisati ukupna funkcija prenosa u kompleksnom obliku. Na slici 3.3 prikazana je kaskadna veza n sklopova koji imaju različite funkcije prenosa.



Slika 3.3. Kaskadna veza n sklopova

Izlaz prvog sklopa veže se na ulaz drugog, što znači da je odziv prvog sklopa jednak pobudi drugog sklopa, i tako redom do zadnjeg sklopa. Za zadatu kaskadnu vezu može se definisati jedan sklop koji može zamijeniti kompletnu kaskadnu vezu. Za taj sklop može se definisati ukupna funkcija prenosa, koja je u funkciji pojedinačnih funkcija prenosa pojedinih sklopova. Ukupna funkcija prenosa kaskadne veze sklopova jednaka je odnosu odziva zadnjeg sklopa i pobude prvog sklopa:

$$H(j\omega) = \frac{Y_n(j\omega)}{X_1(j\omega)}.$$

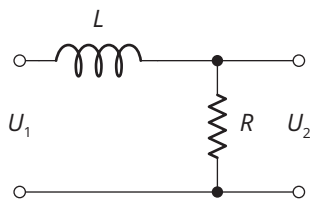
Lako se može dokazati, množenjem prethodnog razlomka sa razlomcima:

$$\frac{Y_1(j\omega)}{Y_1(j\omega)} \cdot \frac{Y_2(j\omega)}{Y_2(j\omega)} \cdot \frac{Y_3(j\omega)}{Y_3(j\omega)} \cdot \dots \cdot \frac{Y_{n-1}(j\omega)}{Y_{n-1}(j\omega)},$$

da je ukupna funkcija prenosa n sklopova jednaka proizvodu prenosnih funkcija pojedinih sklopova:

$$H(j\omega) = H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega) \cdot H_3(j\omega) \cdot H_4(j\omega) \cdot \dots \cdot H_n(j\omega) \quad (3.3)$$

Primjer 3.1. Odrediti funkciju prenosa LR kola sa slike 3.4.



Slika 3.4. RL kolo

Rješenje:

Prenosna funkcija ovog kola biće odnos izlaznog (odziv) i ulaznog (pobuda) napona. Kako je:

$$\underline{U}_2 = \frac{R}{R + j\omega L} \underline{U}_1,$$

to je funkcija prenosa kola:

$$H(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{R}{R + j\omega L}.$$

Primjer 3.2. Pokazati da će apsolutna vrijednost (moduo) funkcije prenosa za kolo sa slike 3.4 biti:

$$|H(j\omega)| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

dok će njen argument biti:

$$\varphi = -\arctg \frac{\omega L}{R}.$$

Rješenje:

Množenjem i brojioca i imenioca funkcije sa $R - j\omega L$, funkciju prenosa možemo razdvojiti na realni i imaginarni dio:

$$H(j\omega) = \frac{R^2}{R^2 + (\omega L)^2} - j \frac{R\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Iz definicije modula kompleksnog broja $z = x + jy$, $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$

i iz definicije argumenta $\varphi = \arctg \frac{y}{x}$, poslije jednostavnih matematičkih operacija dobijamo da je:

$$|H(j\omega)| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \text{ odnosno } \varphi = -\arctg \frac{\omega L}{R}.$$

3.1.1.2. Amplitudska i fazna karakteristika

Kako je funkcija prenosa kompleksna veličina, onda se ona može predstaviti u obliku:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \tag{3.4}.$$

Moduo funkcije prenosa $|H(j\omega)|$ i njen argument $\varphi(\omega)$ nazivaju se **amplitudska i fazna karakteristika** kola. Ove veličine zavise od učestanosti signala koji se prenosi.

Dijagrami na kojima se prikazuju zavisnosti modula i argumenta prenosne funkcije od učestanosti, predstavljaju amplitudsku i faznu karakteristiku kola.

Amplitudska karakteristika pokazuje uticaj sistema prenosa na promjene amplitude na određenoj učestanosti. Ako se sistem prenosa predstavi električnim kolom, onda amplitudska karakteristika određuje kako kolo utiče na amplitudu signala. Vrijednost amplitudske karakteristike na određenoj učestanosti predstavlja **pojačanje** kola ako je izlazni signal jači od ulaznog, ili **slabljenje** kola ako je izlazni signal slabiji od signala na ulazu kola.

Faznom karakteristikom određena je fazna razlika između odziva i pobude.

Amplitudska karakteristika pokazuje koliko kolo pojačava ili slabi signal na određenoj učestanosti. Fazna karakteristika pokazuje kako na određenoj učestanosti izlazni signal kola prethodi ili zaostaje u fazi za ulaznim signalom.

Amplitudska karakteristika kaskadne veze više četvoropola jednaka je **proizvodu** amplitudskih karakteristika pojedinih elemenata u serijskoj vezi. Može se pokazati da je fazna karakteristika kaskadne veze više četvoropola jednaka **zbiru** faznih karakteristika pojedinih elemenata u serijskoj vezi.

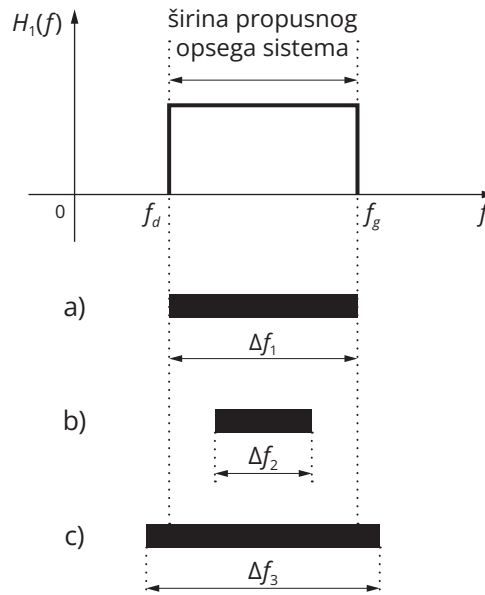
3.1.1.3. Propusni opseg

Važna karakteristika komunikacionog sistema jeste **širina propusnog opsega** ili frekvencijski opseg (engl. *bandwidth*). Svaki signal ima svoju spektralnu širinu, odnosno skup učestanosti koje sadrži njegov spektar. Širina propusnog opsega sistema predstavlja opseg učestanosti u kojem se signal prenosi. Definiše se kao razlika između gornje i donje granične učestanosti signala koje sistem propušta.

Zadatak svakog komunikacionog sistema jeste da prenese signal u svom propusnom opsegu. Ako se spektar signala poklapa sa opsegom učestanosti koje može da prenese sistem za prenos, ili ako je spektar signala manji od opsega učestanosti koje sistem za prenos može da prenese, onda se mogu prenijeti sve komponente signala, pa nema gubitaka. Ako je spektar signala širi od propusnog opsega sistema, neke komponente signala ne mogu se prenijeti, one se gube, pa signal mijenja svoj oblik, odnosno on se **izobličava**. Izobličenje signala ispoljava se u vremenskoj promjeni oblika signala koji se prenosi, i u tom slučaju on se razlikuje od originalnog predajnog signala po svim svojim parametrima. Kako je širina spektra svakog korisnog signala teorijski beskonačno velika, u praksi se sistemi za prenos projektuju tako da imaju propusni opseg koji sadrži **značajne komponente signala** dovoljne za njegov kvalitetan i pouzdan prenos, odnosno za prenos bez izobličenja.

Propusni opseg izražava se u hercima (Hz). Veće jedinice su kiloherc (hiljada herca, kHz), megaherc (milion herca, MHz) i gigaherc (milijarda herca, GHz).

Na slici 3.5 dat je grafički prikaz propusnog opsega sistema za prenos podataka, od donje f_d do gornje f_g granične učestanosti i tri spektralne širine signala, za tri opisana slučaja prenosa podataka, gdje je $H_1(f)$ prenosna karakteristika sistema, a Δf_1 , Δf_2 i Δf_3 širine spektra signala koji se prenosi. Širina propusnog opsega sistema i signala mogu se predstaviti pojednostavljeno u obliku pravougaonika.



Slika 3.5. Širina propusnog opsega sistema i širina spektra signala koji je: a) jednak širini propusnog opsega sistema, b) manji od širine propusnog opsega sistema i c) veći od širine propusnog opsega sistema

Idealan telekomunikacioni sistem trebalo bi da omogući prenošenje svih spektralnih komponenti signala od 0 Hz do beskonačnosti, što je u praksi nemoguće. Realan telekomunikacioni sistem ima svoj opseg učestanosti u kojem sistem prenosi signal, a van tog opsega ne prenosi njegove spektralne komponente ili ih maksimalno slabi.

Propusni opseg zavisi od fizičkih karakteristika medijuma kojim se signal prenosi, odnosno od konstrukcije sklopova u predajnom i prijemnom dijelu komunikacionog sistema.

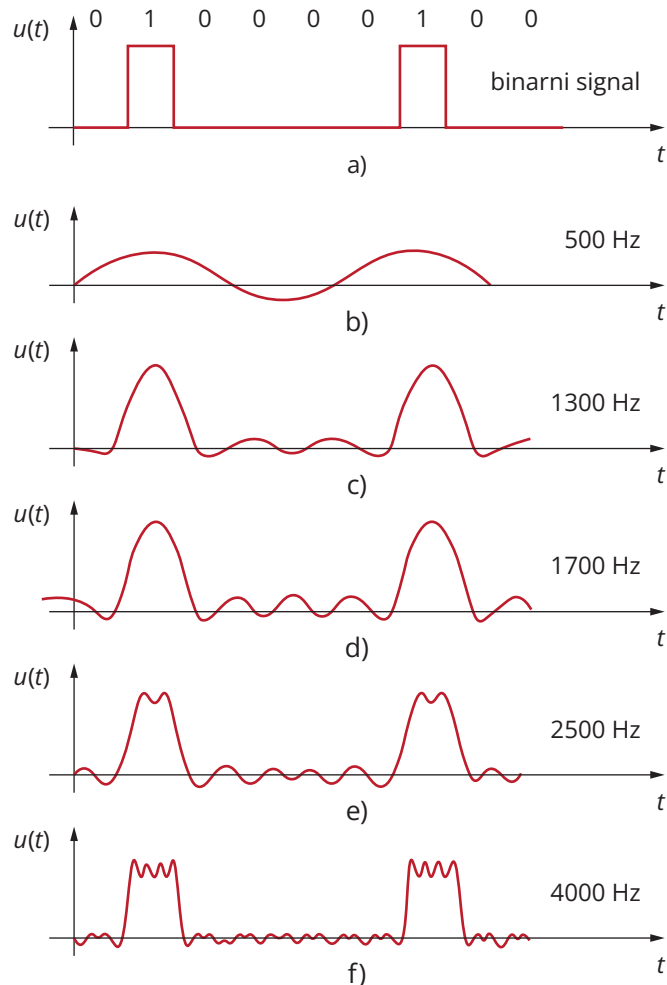
PRIMJER IZ PRAKSE

Na kraćim rastojanjima, od nekoliko stotina metara, telefonska linija se koristi za tehnologiju VDSL (*very-high-bitrate digital subscriber line*, digitalna tehnologija sa veoma velikim protocima) koja koristi opseg do 12 MHz, a u novije vrijeme i za tehnologiju VDSL2 (domet oko 1200 m) koja koristi opseg do 30 MHz na telefonskoj liniji realizovanoj sa upredenom bakarnom paricom. Telefonski kanal zauzima opseg od 300 Hz do 3400 Hz, a zbog

zaštitnog opsega usvojeno je da jedan telefonski kanal zauzima opseg do 4 kHz.

Od osnovnih signala koji predstavljaju realne poruke, izdvojimo još signal muzike i televizijski signal. Propisana potrebna širina opsega za prenos muzičkog signala jeste od 30 Hz do 15 kHz, dok je opseg koji zauzima video-signal od 10 Hz do 5 MHz.

Propusni opseg komunikacionog sistema ima velik uticaj na oblik signala koji se prenosi. Primjer uticaja širine propusnog opsega kanala na oblik signala prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Uticaj širine propusnog opsega kanala na oblik signala

Na slici 3.6a prikazan je idealni binarni signal 010000100 koji se prenosi telefonskim kanalom. Osnovne karakteristike ovog signala jesu vrijeme trajanja logičke jedinice i nule, kao i njegov spektar. Spektar signala zavisi od trajanja logičke jedinice i nule. Spektar binarnog impulsa teorijski je beskonačno širok, ali se istraživanjem u praksi pokazalo da oko 90% energije signala nalazi u opsegu $1/\tau$, gdje je τ trajanje binarnog impulsa, odnosno trajanje logičke jedinice ili logičke nule. To znači da, ako je npr. trajanje logičke jedinice ili nule 1 ms, onda se u spektru signala do učestanosti $1/1 \text{ ms} = 1 \text{ kHz}$ prenosi oko 90% njegove predajne energije. To je više nego dovoljno za prenos binarnog impulsa kroz kanal čiji propusni opseg nije manji od 1 kHz.

Što veći broj spektralnih komponenti binarnog signala uspije da prođe kroz kanal, prenijeti signal sličniji je početnom, originalnom signalu.

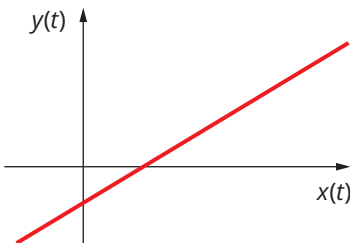
Sa slike se vidi da se, ako je propusni opseg kanala manji od 1 kHz (slika 3.6b), binarni signal ne može ni prepoznati, pa se samim tim ne može ni rekonstruisati u prijemniku. Povećanjem propusnog opsega propušta se veći broj harmonika, tako da dobijeni signal sve više liči originalnom. Na kraju, propuštanjem signala kroz propusni opseg telefonskog kanala od 4000 Hz (slika 3.6f) dobija se kvalitetan oblik signala, iz kojeg se može lako rekonstruisati originalna povorka impulsa, odnosno binarni signal.

Zaključujemo:

Talasni oblik izlaznog signala zavisi od širine propusnog opsega sistema. Ako je sistem prenosa takav da je njegov propusni opseg jednak graničnoj učestanosti signala ili veći od nje, signal će se prenijeti bez izobličenja ili sa izobličenjem koje neće bitno uticati na kvalitet signala. Ako se signal prenosi kroz sistem užeg propusnog opsega od granične učestanosti signala, onda će se signal izobličiti, što će uticati na kvalitet signala.

3.1.2. Linearni i nelinearni sistemi prenosa

Sistemi koji će obezbijediti da napon odnosno struja na njegovom izlazu budu direktno srazmjerni naponu odnosno struji na ulazu u sistem, nazivaju se **linearni sistemi**. Linearni sistemi obezbjeđuju linearnu zavisnost izlaznih od ulaznih veličina. Ako je $x(t)$ pobuda, a $y(t)$ odziv telekomunikacionog linearnog sistema u vremenu, onda je funkcija na izlazu telekomunikacionog sistema linearna:



Slika 3.7. Funkcija prenosa linearnog telekomunikacionog sistema

$$y(t) = k \cdot x(t) + n \quad (3.4),$$

gdje su k i n konstante. Ako je $k < 1$ sistem unosi slabljenje, a ako je $k > 1$ sistem unosi pojačanje.

Znamo iz matematike da je grafik linearne funkcije prava linija, pa zaključujemo da je grafik funkcije prenosa **linearnog telekomunikacionog** sistema prava. Na slici 3.7 prikazana je funkcija prenosa linearnog telekomunikacionog sistema u zavisnosti od vremena.

S obzirom na to da je kod linearnih sistema izlazni signal direktno srazmjern ulaznom, zaključujemo:

Linearna kola ne izazivaju promjene učestanosti signala koji se prenose ovim kolom.

Linearnim sistemom moguće je vjerno prenijeti signal. Odstupanja od linearnosti uvijek su uzrok izobličenja signala.

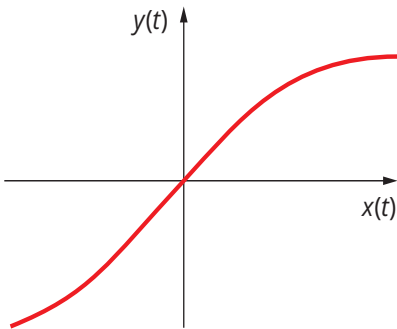
Neke funkcije koje se zahtijevaju od pojedinih sklopova, ne mogu se realizovati linearnim kolima. Takvi sklopovi su pojačavači, modulatori, demodulatori, odnosno sklopovi koji koriste aktivne poluprovodničke komponente, diode i tranzistore. Sistemi kod kojih signal na izlazu nije u srazmjeri sa ulaznim signalom, nazivaju se **nelinearni sistemi**.

Ako je $x(t)$ pobuda a $y(t)$ odziv telekomunikacionog nelinearnog sistema u vremenu, onda je funkcija na izlazu telekomunikacionog sistema:

$$y(t) = k_1 \cdot x(t) + k_2 \cdot x^2(t) + k_3 \cdot x^3(t) + k_4 \cdot x^4(t) + \dots \quad (3.5),$$

gdje su $k_1, k_2, k_3, k_4, \dots$ konstante.

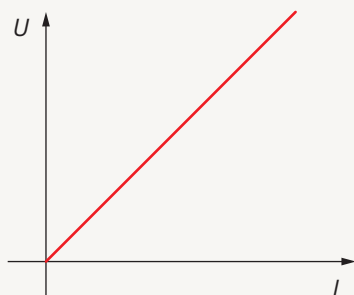
Prva komponenta je linearna komponenta sistema. Ostale su nelinearne komponente sistema. Grafici nelinearnih funkcija jesu krive linije. Na slici 3.8 prikazana je funkcija prenosa nelinearnog telekomunikacionog sistema u vremenu.



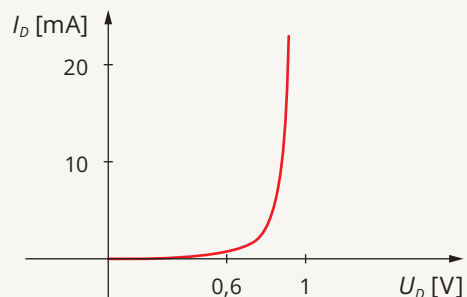
Slika 3.8. Funkcija prenosa nelinearnog telekomunikacionog sistema

PRIMJER IZ PRAKSE

Primjer linearnog sistema u elektrotehnici jeste prosto električno kolo jednosmjerne struje sa otpornikom. Po Omovom zakonu, napon je na krajevima otpornika linearna funkcija struje kroz otpornik: $U = RI$.



Primjer nelinearnog sistema u elektrotehnici jeste električno kolo sa diodom. Kako otpornost diode zavisi od intenziteta i polariteta napona na koji je priključen, Ohmov zakon ne važi. Sa grafika na kojem je prikazana zavisnost jačine struje od napona, vidi se da ova zavisnost nije linearna.



Pojačavačka kola su primjer nelinearnih sistema. Kod linearnih kola napon na izlazu kola direktno je srazmjernan naponu na ulazu. Kod pojačavačkih kola, građenih od aktivnih elemenata (kao što su tranzistori), signal na izlazu je pojačan u odnosu na ulazni signal. S obzirom na to da aktivni elementi pojačavaju signale na račun baterija kojima se napajaju, i da ti izvori imaju konačnu energiju, jasno je da – pojačanjem ulaznog signala – pojačavačko kolo neće beskonačno dugo moći da pojačava ulazni signal. Kada prestane da ga pojačava, sistem ulazi u **zasićenje**, i izlazni signal više nije srazmjernan ulaznom signalu. Kako nije srazmjernan, onda se u izlaznom signalu javljaju komponente učestanosti (odnosno harmonici) koje ne postoje u ulaznom signalu. Dakle, za razliku od linearnih, nelinearna kola izazivaju promjene učestanosti signala koji se prenose tim kolom.

Sistemi kod kojih se na izlazu generišu komponente novih učestanosti, predstavljaju nelinearne sisteme.

Bez obzira na to što prouzrokuju izobličenja signala, nelinearni sistemi ne da nijesu nepoželjni, već su u telekomunikacionim sistemima i neophodni. Odgovarajuće operacije obrade signala, kao što je modulacija i demodulacija, koje ćeš izučavati u drugom razredu, mogu se obavljati isključivo u nelinearnim sistemima. U procesu modulacije vrši se pomjeranje spektra; dakle, generišu se nove učestanosti koje ostvaruju nelinearna kola.

I linearna i nelinearna kola mogu da promijene oblik signala, tj. da ga izobliče. Izobličenja koja nastaju u linearnim telekomunikacionim sistemima zovu se **linearna izobličenja**. Ona mogu biti amplitudska, fazna ili kombinovana – kombinacija amplitudskih i faznih izobličenja. Amplitudska izobličenja nastaju u linearnim sistemima u kojima amplitudska karakteristika odstupa od idealne, odnosno zavisna je od učestanosti i nije konstantna. Fazna izobličenja nastaju usljed odstupanja fazne karakteristike od idealne, odnosno: fazna karakteristika zavisna je od učestanosti i nije linearna.

Izobličenja nastala u nelinearnim sistemima nazivaju se **nelinearna izobličenja**. Primjer nelinearnih izobličenja jeste pojava novih komponenti u izlaznom signalu koje se nazivaju **parazitni produkti**. Sem što mogu da izobliče signal koji ih je svojim prolaskom kroz nelinearni sistem sâm generisao, parazitni produkti mogu da se pojave kao smetnja i u nekom drugom nezavisnom kanalu.

Nelinearna izobličenja ne mogu se potpuno ukloniti iz telekomunikacionih sistema. Međutim, na osnovu istraživanja iz prakse, mogu se odrediti okviri u kojima se nelinearna izobličenja mogu tolerisati. Na osnovu tih okvira mogu se projektovati takva kola, kod kojih će prisustvo nelinearnih izobličenja biti u prihvatljivim granicama.

3.1.2.1. Idealni i realni sistemi prenosa

Osnovna je namjena telekomunikacionog sistema da se na njegovom izlazu dobije isti onakav signal kao što je poslat. Takvi sistemi nazivaju se **idealni sistemi prenosa**.

Očigledno, idealni sistem prenosa je onaj kod koga je izlazni signal $y(t)$ identičan ulaznom signalu $x(t)$. Kako se pomjeranjem signala duž x -ose ne mijenja njegov oblik, onda se definicija idealnog sistema može proširiti i na sisteme koji ne mijenjaju oblik ali mijenjaju veličinu ulaznog signala i pomjeraju ga duž vremenske ose za neku vrijednost vremena (kašnjenje signala).

Pod idealnim sistemom prenosa podrazumijeva se onaj sistem čiji je odziv oblika:

$$y(t) = Ax(t - t_0) \quad (3.6).$$

Iz izraza 3.6 vidi se da je izlazni signal pojačan ili oslabljen u odnosu na ulazni za faktor A (pojačan A puta, ako je $A > 1$, a oslabljen A puta, ako je $0 < A < 1$), i da je izlazni signal u odnosu na ulazni pomjeren duž vremenske ose za vrijednost t_0 . Vrijednost t_0 predstavlja **kašnjenje signala**.

Dakle, idealni sistem prenosa može da mijenja (pojača ili oslabi) amplitudu pobudnog signala za konstantan iznos, odnosno $A = const$, ili da unese neko konstantno kašnjenje između odziva i pobude. Da bi bio ispunjen uslov $A = const$, onda A ne smije zavisiti od frekvencije, tj. mora važiti:

$$A(\omega) = A = const \quad (3.7).$$

Da bi kašnjenje između odziva i pobude imalo konstantnu vrijednost, pokazuje se da je potrebno da fazna karakteristika sistema za prenos linearno zavisi od učestanosti, odnosno da mora važiti:

$$\varphi(\omega) = -\omega t_0 \quad (3.8).$$

Zaključujemo:

Prenos će biti idealan ako sistem ima amplitudsku karakteristiku koja ne zavisi od učestanosti:

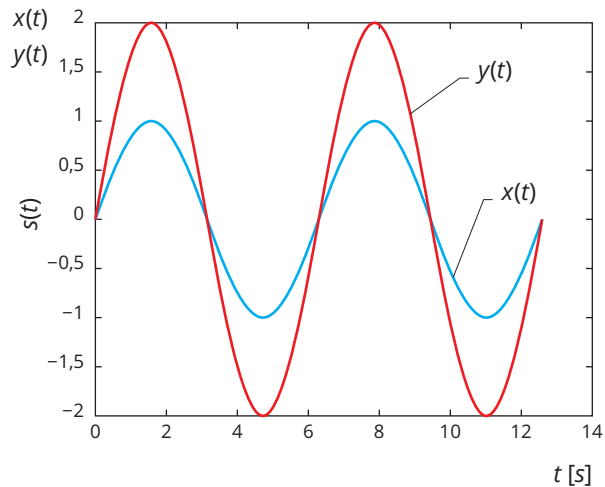
$$A(\omega) = A = const$$

i faznu karakteristiku koja je linearna funkcija učestanosti:

$$\varphi(\omega) = -\omega t_0.$$

Ni u jednom od ova dva slučaja ne mijenja se informacija koja se prenosi idealnim sistemom.

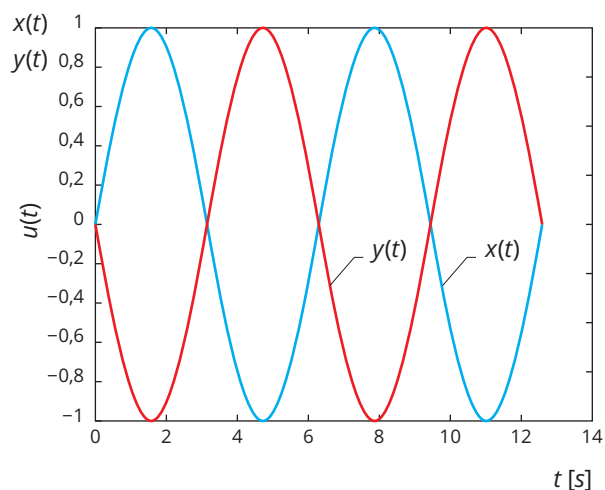
Na slici 3.9 prikazani su pobuda $x(t)$ i odziv idealnog telekomunikacionog sistema $y(t)$ u vremenu, koji mijenja amplitudu odziva signala.



Slika 3.9. Pobuda i odziv idealnog telekomunikacionog sistema sa promjenom amplitude na izlazu sistema

Signali pobude i odziva na slici 3.9 imaju iste periode ponavljanja, što znači da imaju i iste učestanosti kao i iste početne faze. Razlikuju se u trenutnim amplitudama signala. Kako je amplituda odziva signala dva puta veća od pobude, to telekomunikacioni sistem vrši pojačanje signala.

Na slici 3.10 prikazani su pobuda $x(t)$ i odziv idealnog telekomunikacionog sistema $y(t)$ u vremenu, koji unosi fazno kašnjenje odziva signala za polovinu periode ulaznog ili izlaznog signala.

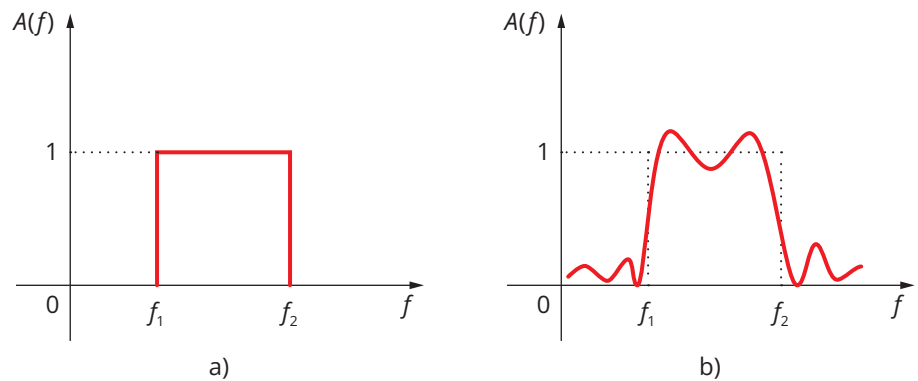


Slika 3.10. Pobuda i odziv idealnog telekomunikacionog sistema sa faznim kašnjenjem na izlazu sistema

Signali pobude i odziva na slici 3.10 imaju iste periode ponavljanja, što znači da imaju i iste učestanosti. Međutim, razlikuju im se početne faze, i to za polovinu periode ponavljanja signala. Znači, sistem unosi konstantno kašnjenje između signala odziva i signala pobude.

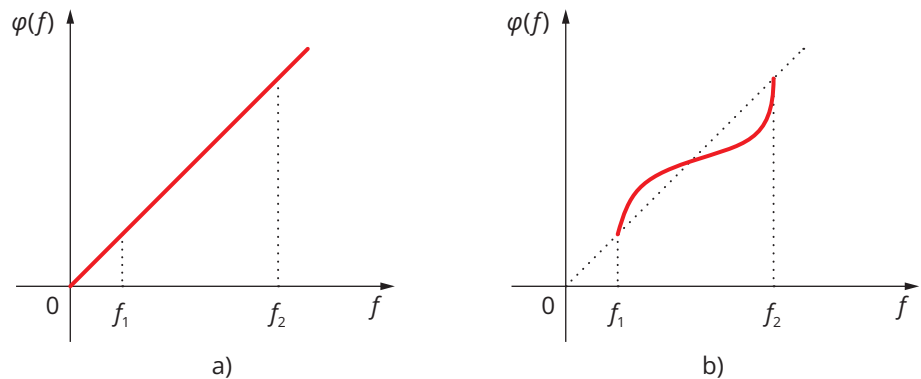
Telekomunikacioni sistemi koji bi imali idealnu funkciju prenosa ne mogu se fizički realizovati, jer se ne mogu postići istovremeno oba uslova za idealan prenos. Zbog toga se signali prenose **realnim sistemima prenosa**. Realni sistemi prenosa imaju karakteristike koje izobličuju ulazni pobudni signal, i njihova amplitudska karakteristika zavisi od učestanosti. Fazna karakteristika takvih sistema nije linearna, već je nelinearna funkcija učestanosti.

Radi ilustracije, na slici 3.11 prikazane su (a) idealna amplitudska karakteristika i (b) realna amplitudska karakteristika telekomunikacionog sistema.



Slika 3.11. Idealna (a) i realna (b) amplitudska karakteristika telekomunikacionog sistema

Na slici 3.12 prikazane su (a) idealna fazna karakteristika i (b) realna fazna karakteristika telekomunikacionog sistema.



Slika 3.12. Idealna (a) i realna (b) fazna karakteristika telekomunikacionog sistema

3.1.3. Uzroci izobličenja signala

Kod idealnih sistema prenosa, fazna karakteristika je linearno zavisna od učestanosti, dok je amplitudska karakteristika konstanta. Idealni sistemi prenosa ne postoje, već samo stvarni, odnosno realni. Realni sistemi prenosa nemaju idealne karakteristike, pa se u njima uvijek javljaju izobličenja signala. Osnovni uzrok pojave izobličenja jeste nelinearnost sklopova za prenos signala.

Amplitudska izobličenja nastaju onda kada je amplitudska karakteristika zavisna od učestanosti, dok fazna izobličenja nastaju onda kada fazna karakteristika nije linearna funkcija učestanosti. Postoje istovremena i amplitudska i fazna izobličenja, kada nijedan od uslova koje zadovoljava idealan prenos nije ispunjen.

Kada amplitudska karakteristika linearnog sistema zavisi od učestanosti, izlazni signal neće biti vjeran ulaznom signalu. Međusobni odnosi komponenti i u amplitudskom i u faznom spektru signala na izlazu nijesu ostali kakvi su bili na ulazu u sistem. Zbog toga je signal izobličen, bez obzira na to što linearni sistem ne generiše komponente novih učestanosti, odnosno što se u spektru izlaznog signala neće pojaviti nijedna komponenta koja nije postojala u spektru ulaznog signala.

Izobličenja nastala kao posljedica neidealnosti karakteristike sistema za prenos mogu se ublažiti njenim korigovanjem – ugradnjom dodatnih sklopova – kako bi preneseni signal bio što je moguće manje deformisan.

Dodatnim sklopovima koriguju se vrijednosti amplitudskih i faznih karakteristika sistema prenosa. Ako se napravi sistem čija amplitudska karakteristika približno zadovoljava uslov idealnog prenosa, dodavanjem određenog sklopa može se korigovati njegova fazna karakteristika tako da ukupno fazno kašnjenje sistema zadovolji uslov za prenos bez izobličenja. Važi i obrnuto: ako je fazna karakteristika sistema linearna funkcija učestanosti, a amplitudska karakteristika zavisi od učestanosti, onda se korigovanjem amplitudske karakteristike – umetanjem dodatnog elektronskog sklopa – može postići da sistem prenosi signal sa neznatnim izobličenjima.

Drugi razlog izobličenja signala jeste nepoklapanje propusnog opsega sistema i opsega signala. U idealnom sistemu za prenos, pretpostavlja se da signal ima ograničen spektar i da se granice učestanosti u kome se on nalazi poklapaju sa graničnim učestanostima sistema za prenos. Ukoliko je propusni opseg sistema uži od širine spektra signala, jasno je da će nedostajanje nekih komponenti u spektru signala unijeti izobličenja u preneseni signal.

PRIMJENA U PRAKSI

Utjecaj izobličenja na signale zavisi i od prirode signala. Na primjer, izobličen talasni oblik signala govora, koji je prouzrokovan nelinearnom fazom, nema takav uticaj na reprodukciju signala kao što

bi imao izobličen talasni oblik signala u televiziji. Dakle, od vrste prenesene poruke zavisi dozvoljeno odstupanje u vjernosti reprodukcije.

Talasni oblik izlaznog signala zavisi od širine propusnog opsega sistema. Za ispitivanje uticaja propusnog opsega na talasni oblik signala koriste se testni impulsi.

DODATAK +

Ispitivanje uticaja propusnog opsega na talasni oblik signala

Na prenosni sistem dovodi se impuls odgovarajućeg trajanja, a onda se posmatra odziv sistema na taj impuls. Analizom nekih detalja u talasnom obliku signala, kao što su **trajanje impulsa** i **vrijeme uspostavljanja**, ispituje se uticaj propusnog opsega na talasni oblik signala.

Ako se sistemom prenosi neki impuls trajanja τ , čija je širina spektra B , može se dokazati da je $\tau = \frac{1}{2B}$, odnosno da vrijeme trajanja impulsa i širina njegovog spektra stoje u obrnuto srazmjernom odnosu.

Pri prenosu impulsa kroz sistem važno je utvrditi i šta se dešava sa njegovom prednjom ivicom na izlazu sistema, kakav je njen oblik, te kada će da se pojavi na izlazu. Vrijeme pojave prednje ivice signala na izlazu naziva se **vrijeme uspostavljanja**. Pokazuje se da je vrijeme uspostavljanja impulsa obrnuto srazmjerno dvostrukoj širini propusnog opsega sistema. Otuda se može izvesti zaključak da će se impuls na izlazu sistema brže uspostaviti (što istovremeno znači da će biti i vjerniji originalu) ukoliko je širina propusnog opsega veća. Ako je propusni opseg manji, vrijeme uspostavljanja se povećava, izlazni signal će imati prednju ivicu sa nagibom, odnosno signal će biti izobličen.

Određivanje potrebne širine propusnog opsega sistema predstavlja jedan od osnovnih zadataka u projektovanju sistema i njegovih sklopova. Ona je vezana sa vrstom poruka koje se prenose, potrebama za vjernost prenesenog signala i mogućnostima tehničke realizacije.

Poseban uticaj na pojavu izobličenja imaju šumovi, sa kojima ćemo se detaljnije upoznati u narednom odjeljku.

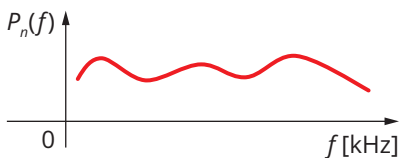
3.2. Šumovi

Pri prenosu signala, u telekomunikacionom sistemu pojavljuju se različite smetnje, koje opštim imenom nazivamo **šum**. Šum je pojava u prenosu signala pod kojim se podrazumijevaju svi signali koji se pojavljuju u prenosu, a koji nemaju sadržajne veze sa korisnim signalom koji se prenosi. Šumovi potiču iz drugih izvora u odnosu na korisni signal. Svuda su prisutni, a stvaraju ih prirodne i vještačke pojave, kao što su vjetar, kiša, atmosferska pražnjenja, mašine, saobraćajna sredstva.

Rekli smo da u telekomunikacijama šum uvijek prati korisni signal koji se prenosi. Šumovi se ispoljavaju kao zvučni efekti (šuštanje u zvučniku ili slušalicama, pri slušanju muzike ili radio-programa), kao i u pojavama koje se ne čuju ali se vide, kao što su svjetlucanja na TV ekranu. Pri prenosu podataka u računarskim mrežama, šumovi se javljaju u vidu grešaka na bitovima.

Šumovi mogu da maskiraju korisni signal i da izazivaju greške u prenosu. Zbog toga predstavljaju faktore koji slabe kvalitet veze i ograničavaju njihov domet. Uticaj šuma na različite vrste signala nije isti. Na neke signale šum djeluje jače, a na neke signale slabije. Zato je veoma važno poznavati osobine signala i njihovu osjetljivost na šum, kako bi se povećala otpornost signala na pojavu šuma i omogućio prenos signala kroz realni telekomunikacioni sistem.

Šumovi se obično označavaju slovom N (engl. *noise* – šum). Šum u sistemu je slučajna pojava, koja se opisuje spektralnom gustinom srednje snage šuma (P_N). Spektar šuma je kontinualan, ima teorijski neograničen broj spektralnih komponenti, čije se učestanosti kontinualno mijenjaju. Na slici 3.13 prikazana je zavisnost snage šuma (P_N) od učestanosti.



Slika 3.13. Signal šuma širokog frekvencijskog opsega

U telekomunikacionom sistemu uticaj šuma najčešće se izražava preko odnosa srednje snage signala i srednje snage šuma, to jest kao odnos S/N (S – signal, N – šum), što predstavlja **nivo šuma** (n_N) na izlazu sistema (prijemnika). Pošto se radi o odnosu srednjih snaga signala i šuma, onda je jedinica za nivo šuma u sistemu bez dimenzija. Zato se takav broj najčešće izražava kao logaritamski odnos. Ako se koristi dekadni logaritam (\log), onda se jedinica zove **decibel** (dB). Nivo šuma (u decibelima) računa se iz izraza:

$$n_N = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) \text{ [dB]} \quad (3.9)$$

Signal i šum se miješaju. Telekomunikacioni sistem utiče podjednako i na signal i na šum. Ako je odnos signala i šuma jednak 1 (ili jednak 0 dB), to znači da je srednja snaga signala jednaka srednjoj snazi šuma. Ako je odnos signala i šuma veći od 1 (nivo šuma je pozitivan), onda je srednja snaga signala veća od srednje snage šuma, pa je signal dominantniji u odnosu na šum. Ako je odnos snage signala i snage šuma manji od 1 (nivo šuma

je negativan), onda snaga šuma premašuje snagu signala, te je tada usljed šuma nemoguće izdvojiti korisni signal.

Šumove prouzrokuju različite pojave. U zavisnosti od porijekla, šumovi se dijele na ambijentalne, šumove nastale usljed napajanja električnom energijom, atmosferske, termičke, intermodulacione i šumove nastale usljed preslušavanja.

Šum prostorije u kojoj se govori, i koji se transformacijom preko mikrofona prenosi u telekomunikacioni sistem, naziva se **ambijentalni šum**. On predstavlja jedini šum koji nema električnu prirodu.

Električna struja je usmjereno kretanje elektrona kroz provodnik. Kretanja elektrona izazivaju pojavu šuma u električnim uređajima, i ne mogu se izbjeći. Međutim, šumovi koji potiču od napajanja uređaja električnom energijom mogu se pažljivom konstrukcijom i izradom uređaja svesti na takav nivo da bitno ne utiču na kvalitet veze.

Atmosferski šumovi potiču od pojava u atmosferi, kao što su atmosferska pražnjenja, Sunčevo zračenje, kosmička zračenja i slično. Ove pojave uglavnom imaju uticaj na nadzemne telekomunikacione vodove, koji se postavljaju na stubovima (vazdušni vodovi), dok je njihov uticaj na podzemne kablove i optičke vodove neznatan. Slični šumovi nastaju i usljed varničenja u električnim uređajima i postrojenjima.

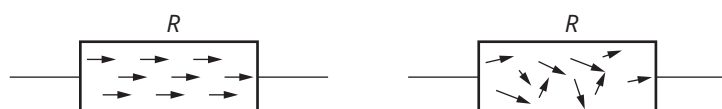
U telekomunikacijama, poseban značaj imaju termički šum, intermodulacioni šum i šumovi nastali usljed preslušavanja.

3.2.1. Termički šum

Termički šum predstavlja pojavu koju imaju svi sistemi čija je apsolutna temperatura T veća od $0\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Termički šumovi obično se javljaju na otpornicima u električnim kolima uređaja, kao posljedica nepravilnog kretanja, odnosno kretanja u različitim smjerovima, slobodnih naelektrisanja u materijalu. U provodnicima je nepravilno kretanje elektrona, kao nosilaca naelektrisanja, prouzrokovano termičkim djelovanjem (interakcijama) između njih i oscilujućih molekula provodnika.

Smjerovi struje kroz idealan i realan otpornik prikazani su na slici 3.14.



Slika 3.14. Termički šum u otporniku: a) struja kroz idealni otpornik – bez šuma, b) struja kroz realni otpornik – otpornik sa termičkim šumom

Usljed međusobnih sudara nosilaca naelektrisanja u otpornicima, kao i sudara sa strukturama kristalne rešetke, kinetička energija slobodnih nosilaca transformiše se u toplotnu energiju, koja se manifestuje kao šum. Kako su ovi sudari neizbježni na temperaturama višim od 0 °K, zaključujemo:

Termički šum predstavlja pojavu koja je svojstvena svim sistemima čija je apsolutna temperatura (T) viša od 0 °K.

Osim otpornika, i tranzistori predstavljaju značajan izvor šuma, naročito u pojačavačkim uređajima. Šumovi u tranzistorima su raznovrsnog porijekla, a najčešće se javljaju kao posljedica sudara nosilaca naelektrisanja u tranzistorima (elektroni i šupljine) i kao posljedica rekombinacije nosilaca naelektrisanja u poluprovodničkim komponentama tranzistora.

Sudari su slučajni i ne mogu se predvidjeti. Zbog toga termički šum spada u vrstu šumova poznatu pod nazivom *slučajan šum*. Kako je termički šum slučajan proces, on se ne može tačno odrediti, ali se – na osnovu posmatranja velikog broja slučajeva – statističkim metodama mogu izračunati njegovi najznačajniji parametri. Jedan od parametara koji može dovoljno dobro opisati ovaj šum jeste njegova *srednja snaga* ($\overline{P_N}$). U termodinamici, dijelu fizike koja izučava toplotne procese i pojave, pokazuje se da je:

$$\overline{P_N} = kTB \quad (3.10),$$

gdje su: k – Bolcmanova konstanta, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K; T – apsolutna temperatura (u kelvinima, K); B – opseg učestanosti (u Hz).

Primjer 3.3. Izračunati srednju snagu termičkog šuma na sobnoj temperaturi 293 °K (20 °C) pri propusnom opsegu 1 MHz.

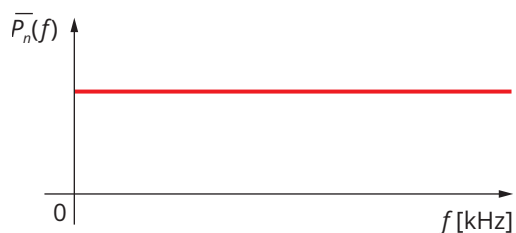
Rješenje:

$$\begin{aligned} \overline{P_N} &= kTB \\ &= 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 293 \text{ °K} \cdot 10^6 \text{ Hz} \\ &= 4,05 \cdot 10^{-15} \text{ W} \end{aligned}$$

NAPOMENA

Analogija s bijelom bojom potiče od toga što i bijelu svjetlost, koja u sebi sadrži sve boje vidljive svjetlosti, karakteriše srednja snaga ravnomjerno raspodijeljena na sve učestanosti vidljivog dijela spektra.

Iz formule se vidi da srednja snaga termičkog šuma na konstantnoj temperaturi (T) zavisi samo od širine opsega (B), a ne od učestanosti na kojoj se on nalazi (slika 3.15). Pošto mu je srednja snaga konstantna, za ovakav termički šum kaže se da je ravnomjerno raspodijeljen u spektru, i često se naziva ravnim ili **bijelim šumom**.



Slika 3.15. Zavisnost srednje snage bijelog šuma od učestanosti

Pomoću srednje snage termičkog šuma može se izračunati srednja snaga šuma u nekom određenom opsegu učestanosti. Srednja snaga karakteriše šum kao slučajnu pojavu, u prosjeku, u jednom dugom vremenskom intervalu. Zato takav podatak ne kazuje ništa o trenutnim vrijednostima slučajne vremenske funkcije koja opisuje šum, odnosno ne može mu se odrediti trenutna vrijednost. Bez obzira na to što se ne mogu odrediti vrijednosti šuma u nekom trenutku (to je osnovna osobina slučajnih funkcija), može se pretpostaviti da će u nekom dijelu jednog dugog vremenskog intervala amplituda šuma biti veća od neke unaprijed zadate vrijednosti. Ovaj podatak ima velik značaj pri projektovanju telekomunikacionih sistema.

Jedna druga veličina, koja karakteriše telekomunikacione sklopove, predstavlja **faktor šuma**, koji se označava sa \bar{F} . Šum postoji na ulazu u predajnik, u samom predajniku, na ulazu u prijemnik i u samom prijemniku. Odnos S/N na izlazu prijemnika treba da bude što veći. To se postiže odgovarajućom konstrukcijom prijemnika. Faktor šuma prijemnika definiše se kao odnos snaga signala i šuma $(S/N)_{in}$ na ulazu prijemnika i odnosa snaga signala i šuma $(S/N)_{out}$ na izlazu prijemnika. Faktor šuma prijemnika definiše se sljedećom relacijom:

$$\bar{F} = 10 \log \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \text{ [dB]} \quad (3.11).$$

Faktor šuma izražava se u decibelima. U tabeli 3.1 prikazane su vrijednosti srednjeg faktora šuma za prijemnike u sistemima usmjerenih radio-relejnih veza u zavisnosti od opsega učestanosti.

Tabela 3.1. Vrijednosti faktora šuma u prijemnicima usmjerenih radio-relejnih veza

Opseg učestanosti	Faktor šuma
2000 MHz	8 dB
4000 MHz	10 dB
7000 MHz	13 dB

3.2.2. Intermodulacioni šum

Kada signali različitih učestanosti putuju istim prenosnim medijumom, može se javiti **intermodulacioni šum**. Intermodulacioni šum (intermodulacija) najčešće je prouzrokovan nelinearnostima elektronskih sklopova u sistemu. Usljed nelinearnosti sklopova, pri prenosu signala formiraju se dodatne komponente na učestanostima koje nijesu samo na učestanostima harmonika, već npr. i na njihovom zbiru ili razlici.

Za razliku od termičkog, intermodulacioni šum zavisi od signala koji se prenosi. Ovo posebno dolazi do izražaja u višekanalnim sistemima, gdje se složeni signal, usljed prolaska kroz nelinearne elemente, do jedne granice izobličava. Posljedica ovih izobličenja jeste nastajanje velikog broja viših harmonika kao i komponenti koje nijesu direktni umnošci osnovne učestanosti.

Neželjeni proizvodi nastali pri intermodulaciji po svom intenzitetu su vrlo mali, ali su brojni i predstavljaju smetnje. Zbog toga se moraju uzimati u obzir pri projektovanju telekomunikacionih sistema.

Intermodulacija je posebno nepoželjna u radio-prenosu jer se, prilikom emitovanja signala radio-putem, usljed intermodulacije generišu dodatne komponente korisnog signala. Time se povećava opseg učestanosti signala. S obzirom na to da se radio-kanali dimenzionišu tako da odgovaraju opsegu učestanosti korisnog signala, povećanje opsega učestanosti signala prouzrokuje prelazak dijela njegovih komponenti u susjedne radio-kanale, čime se smanjuje jasnoća i kvalitet zvuka.

3.2.3. Šumovi preslušavanja

Termin *preslušavanje* potiče iz telefonije, gdje je označavao prelazak govornih signala iz jednog telefonskog kola u drugo. U teoriji telekomunikacija značenje termina preslušavanje je prošireno, tako da preslušavanje predstavlja prelazak energije signala iz jednog kanala u signal susjednog kanala.

Šumovi preslušavanja najčešće nastaju zbog nelinearnosti karakteristika pojedinih sklopova višekanalnih sistema, zbog elektromagnetne sprege između susjednih bakarnih kablova kojima se prenose informacije, te zbog nesavršenih frekvencijskih karakteristika filtara koje ćemo upoznati u narednom odjeljku.

Uticaji signala iz susjednih kanala na signal koji se prenosi drugim kanalom, mogu biti ili na učestanosti signala ili na različitim učestanostima. U prvom slučaju radi se o razumljivom, a u drugom slučaju o nerazumljivom preslušavanju. Šum razumljivog preslušavanja predstavlja veću smetnju od šuma nerazumljivog preslušavanja.

Preslušavanje je najčešće prisutno pri prenosu signala bakarnim vodovima. Usljed elektromagnetne indukcije, dio energije iz jednog voda prenosi se na susjedni vod. Preslušavanje postoji i kod prenosa poruka optičkim vlaknima. Ono nastaje usljed odlivanja energije fotona svjetlosti između susjednih kanala koji rade na različitim talasnim dužinama. Ova odlivanja kod optičkog prenosa dovode do povećanja amplitude šuma.

Na kraju ovog izlaganja o šumovima, pomenimo i **impulsni šum**. Impulsni šum je nekontinualna smetnja, koja se sastoji od impulsa kratkog trajanja i relativno velike amplitude. Najčešće ga prouzrokuju atmosferske smetnje (udari groma) i električni uređaji.

ZANIMLJIVOST

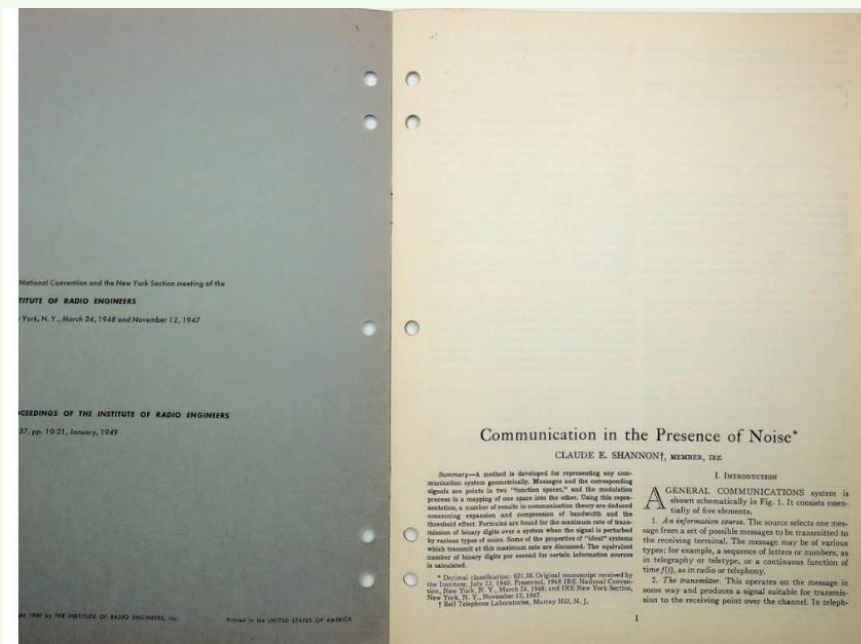
Teorija informacija, nastala 50-ih godina prošlog vijeka zahvaljujući genijalnosti i naporima jednog čovjeka – Kloda Šenona, jedna je od onih rijetkih oblasti u telekomunikacijama koje su išle ispred prakse. Ona je pokazala da šumovi ograničavaju brzinu, a ne, kako se tada mislilo, pouzdanost prenosa informacija. Šenon je dao jednačinu koja je tu brzinu povezala s dvjema veličinama veoma bitnim u praksi – propusnim opsegom (B) i odnosom signal–šum (S/N):

Najveća brzina prenosa iznosi

$$[b/s] = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right).$$

Na primjer, kanali propusnog opsega 3000 Hz, sa odnosom signala i termičkog šuma 30 dB (tipični parametri analognog dijela telefonskog sistema), ne mogu prenositi podatke brzinom mnogo većom od 30 kb/s. Pokušaj da se pokaže suprotno, suprotstavlja se zakonima fizike, i na neki način predstavlja razmišljanje koje podržava mogućnost konstrukcije perpetuum mobile, mašine koja može da radi neograničeno dugo bez spoljašnjeg ulaganja energije.

Na slici je prikazan izvod iz monografije telefonske kompanije Bell u kojoj je prezentovan znameniti Šenonov rad „Komunikacija u prisustvu šuma“, 1949. godine.



Communication in the Presence of Noise [Bell Monograph]

3.3. Filtri

Svaki fizički medijum prenosi signale sa slabljenjem. Kako slabljenje signala zavisi od učestanosti, onda i različiti harmonici signala slabe sa različitim vrijednostima. Ova pojava dovodi do izobličenja ili, kako se kaže, do **distorzije** signala.

Sistem za prenos podataka pojačava ili slabi sve komponente ulaznog signala ili neke od njih, što ima za posljedicu promjenu spektra signala na njegovom izlazu. Kao što smo ranije rekli, svaki sistem ima svoj propusni opseg, a svaki signal koji se prenosi, ima svoj spektar. Ako se signal nalazi u propusnom opsegu sistema, signal se ne slabi, već propušta i pojačava, a van propusnog opsega se slabi. Spektar signala koji se prenosi, može se prilagoditi po svojoj širini spektra propusnom opsegu sistema. Uređaji koji ograničavaju prenosni opseg signala nazivaju se **filtri**.

U mnogim elektronskim uređajima postoje signali različitih učestanosti. Neke od njih treba prenijeti do sljedećeg stepena (uređaja) radi dalje obrade, pojačavanja, modulacije, detekcije i raznih podešavanja. Ostale signale treba spriječiti da stignu na sljedeći stepen, jer su nepotrebni i ometaju normalan rad uređaja. Ovo sprečavanje takođe se ostvaruje pomoću filtarskih kola.

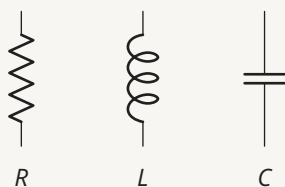
Električni filtri su električna kola kojima se razdvajaju signali različitih učestanosti.

Pošto sprečavaju prenos svih komponenti učestanosti signala na ulazu filtra, zaključujemo da filtri mijenjaju spektar signala na izlazu sistema u odnosu na njegov ulaz.

Prema načinu izrade, filtri se mogu podijeliti u dvije grupe: **pasivne** i **aktivne**.

Pasivni filtri se izrađuju od pasivnih električnih komponenti koje ne mogu pojačavati snagu signala koji se dovodi na njihov ulaz. Pasivne električne komponente su otpornici, kalem i kondenzatori.

Pasivni električni filtri prenose sa malim slabljenjem signale koji se žele prenijeti (korisne signale), dok signale koji se ne žele prenijeti slabe što je moguće više.



Slika 3.16. Simboli pasivnih električnih elemenata

Pasivni električni elementi

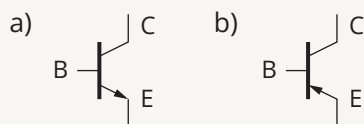
Pasivni električni elementi predstavljaju se simbolima prikazanim na slici 3.16.

Otpornik je pasivni električni element u kojem se električna energija pretvara u toplotu. Veličina koja ga karakteriše jeste *električni otpor*, i ona predstavlja mjeru suprotstavljanja nekog provodnika prolasku električne struje. Označava se sa R , a jedinica joj je Om (Ω). Snaga koja se razvija na otporniku proizvod je struje koja teče kroz njega i napona na njemu: $P = UI$.

Kalem je pasivni električni element u kojem se električna energija pretvara u energiju magnetnog polja. Veličina koja ga karakteriše naziva se *induktivnost* kalema, i označava se sa L , dok joj je jedinica henri (H).

Kondenzator je pasivni električni element u kojem se električna energija pretvara u energiju električnog polja. Veličina koja ga karakteriše naziva se *kapacitivnost* kondenzatora. Označava se sa C , dok joj je jedinica farad (F).

Aktivni filtri izrađuju se od aktivnih komponenti, kao što su tranzistori i integrisana kola.



Slika 3.17. Električni simboli
a) NPN i b) PNP tranzistora

Aktivni električni elementi

Za razliku od pasivnih elemenata, aktivni elementi se u električnim kolima koriste kao ispravljači ili za pojačavanje snage signala koji se dovodi na njihov ulaz. Njihovo djelovanje vrši se na račun baterije kojom se ti aktivni elementi napajaju. Aktivni elementi su tranzistori i integrisana kola. Tranzistori se predstavljaju simbolima prikazanim na slici 3.17.

Aktivni filtri takođe imaju ulogu da prenesu korisne signale, a oslabe signale koji se ne žele prenijeti. To se postiže tako što aktivni filtri pojačavaju korisne signale.

3.3.1. Podjela filtara prema propusnom opsegu

Često je u telekomunikacijama potrebno da se iz velikog broja signala različitih učestanosti izdvoje samo oni čije se učestanosti nalaze u nekom frekvencijskom opsegu. Ovaj opseg naziva se propusni opseg filtra. U zavisnosti od propusnog opsega, filtri se dijele u četiri grupe:

- 1) propusnici opsega učestanosti (PPF – pojasnopropusni filter), koji propuštaju signale opsega između f_N i f_V
- 2) nepropusnici opsega učestanosti, koji ne propuštaju signale opsega između f_N i f_V
- 3) propusnici niskih učestanosti (NF – niskopropusni filteri), koji propuštaju signale učestanosti od $f_N = 0$ do f_V
- 4) propusnici visokih učestanosti (VF – visokopropusni filteri), koji propuštaju signale čije su učestanosti veće od f_V .

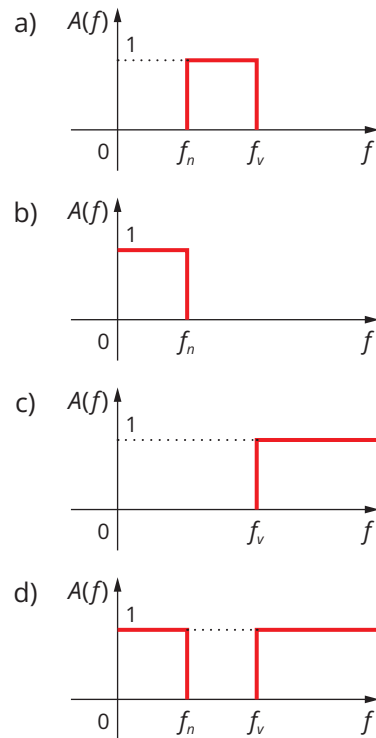
Učestanosti f_N i f_V nazivaju se **granične učestanosti filtra**. Ove granične učestanosti filtra često se zovu donja (f_D) i gornja (f_G) granična učestanost ($f_D = f_N$ i $f_G = f_V$).

Granične učestanosti filtra jesu učestanosti koje razdvajaju oblast učestanosti u kojoj nema slabljenja od oblasti u kojima postoji slabljenje.

U propusnom opsegu filtra vrši se pojačanje ili minimalno slabljenje signala, u zavisnosti od toga da li je filter sa aktivnim ili pasivnim elementima. U nepropusnom opsegu filtra vrši se veliko slabljenje ulaznog signala, tako da se on ne može prenijeti na izlaz filtra. Pošto svaki telekomunikacioni sistem, kao što je ranije navedeno, predstavlja filter, onda se on opisuje svojom frekvencijskom ili prenosnom karakteristikom, koja predstavlja pojačanje filtra u funkciji učestanosti i predstavlja amplitudsku karakteristiku filtra.

Idealni filter u propusnom opsegu ima amplitudsku karakteristiku konstantnu i jednaku 1 ($A(f) = 1$), dok je u nepropusnom opsegu jednaka nuli ($A(f) = 0$).

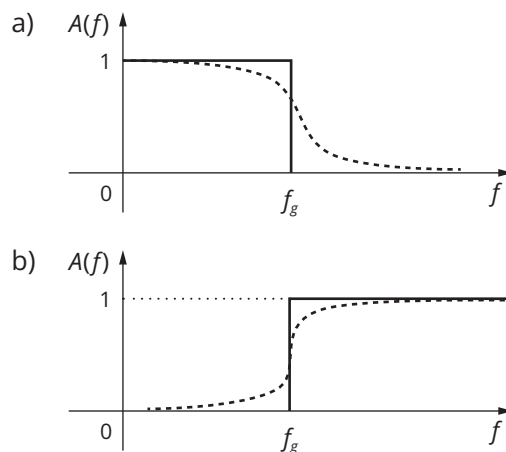
Amplitudske karakteristike idealnih filtara prikazane su na slici 3.18.



Slika 3.18 Amplitudske karakteristike idealnih filtara: a) propusnika opsega učestanosti, b) NF filtra, c) VF filtra, d) nepropusnika opsega učestanosti

Pasivni filtri sadrže reaktivne elemente – kaleme i kondenzatore, čije impedanse zavise od učestanosti. Zbog toga slabljenje i pojačanje aktivnih i pasivnih filtara, u propusnom ili nepropusnom opsegu, zavise od učestanosti. Iz tog razloga filtri u praksi nemaju idealnu, već realnu prenosnu karakteristiku. Odgovarajućim matematičkim metodama izračunavaju se parametri filtara, na osnovu kojih se određuje realna prenosna karakteristika filtra koja će zadovoljiti odgovarajuće, unaprijed zadate uslove.

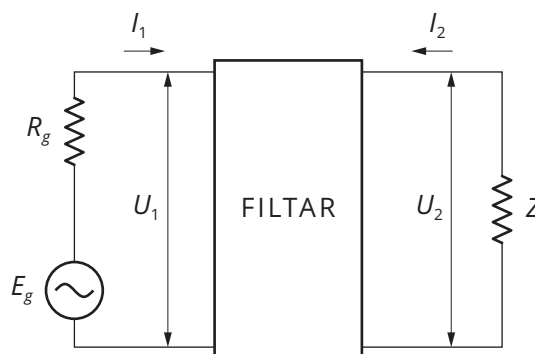
Na slici 3.19 prikazane su idealne (puna linija) i realne (isprekidana linija) prenosne karakteristike NF i VF filtra.



Slika 3.19. Idealne i realne prenosne karakteristike: a) NF i b) VF filtra

3.3.2. Karakteristični parametri filtera

Svaki filter se može predstaviti kao električno kolo koje ima dva ulazna i dva izlazna priključka, odnosno dva para krajeva (slika 3.20). Rekli smo da se električna kola sa dva para krajeva nazivaju **čtetvoropoli**.



Slika 3.20. Filter kao četvoropol

U električnim uređajima filter se može naći između kola koja služe za pojačavanje signala – pojačavačkih stepena, između pojačavačkih kola i antene, između pojačavačkog stepena i zvučnika i sl. Na ulaz filtra veže se generator koji proizvodi signale (napone, struje) različitih učestanosti, a na izlaz filtra veže se potrošač. Filter propušta samo određene spektralne komponente signala. Na slici 3.20 stepen ispred filtra predstavljen je kao generator elektromotorne sile (E_g) i unutrašnje otpornosti (R_g). Elektromotornu silu (EMS) na ulazu filtra generiše napon (U_1 , ulazni napon), koji stvara ulaznu struju (I_1). Stepen iza filtra predstavljen je impedansom Z , koja najčešće predstavlja njegovu izlaznu impedansu. Pod dejstvom ulaznog napona (U_1), na izlazu filtra stvara se izlazna struja (I_2). Izlazna struja na impedansi (Z) generiše napon U_2 .

NAPOMENA

Počevši od 1924. godine, u telekomunikacijama je uobičajeno da se odnos dvije istodimenzionalne veličine ne izražava prostim odnosom, već logaritmom tog odnosa. Glavni je razlog u tome što su veličine odnosa koje se sreću u praksi obično ili vrlo velike ili vrlo male, pa se prelaskom na logaritme tih odnosa množenja i dijeljenja svode na prostije računске radnje – sabiranje i oduzimanje. Drugi je razlog taj što se na logaritamskoj mjernoj skali može predstaviti mnogo širi opseg vrijednosti nego na običnoj mjernoj linearnoj skali. Na primjer, 1000 jedinica na običnoj mjernoj linearnoj skali odgovaraju tri mjerne jedinice na logaritamskoj skali, jer je $\log 1000 = 3$.

Najvažnije osobine filtra opisuju se njegovim karakteristikama. Najznačajnije karakteristike filtera su **granična učestanost, slabljenje (pojačanje) i impedansa**.

Kod filtera se razlikuju područja učestanosti u kojima se ulazni signal slabi od onih u kojima se on propušta bez slabljenja. Komponente signala na ulazu u filter, čije su učestanosti unutar tog područja, pojavljuju se na izlazu filtra sa približno istom amplitudom kao i na ulazu. Zbog toga je slabljenje filtra njegova važna karakteristika.

Ova područja definišu se graničnim učestanostima filtra.

Slabljenje filtra definiše se kao odnos napona na ulazu i izlazu filtra:

$$a = \frac{U_1}{U_2} \quad (3.12).$$

NAPOMENA

Decibel je deseti dio bela, jedinice koja je ime dobila po Belu, pronalazaču telefona. Bel je mjerna jedinica kojom se izražava logaritamski odnos dvije istoimene veličine. Najčešće se koristi u telekomunikacijama i u akustici (za definisanje slabljenja ili pojačanja signala i za određivanje nivoa signala u odnosu na neku referentnu vrijednost). Decibel nema dimenziju, jer je to odnos dvije istoimene veličine. Ako se računa slabljenje kao odnos snaga u decibelima, onda se ispred logaritma koristi umnožak 10, a ako se računa slabljenje odnosa napona ili struja, taj umnožak je 20, kao u jednakosti (3.13).

Slabljenje filtra obično se označava malim slovom a , za razliku od pojačanja koje se označava velikim slovom A .

Slabljenje signala u propusnom opsegu, koji treba prenijeti na stepen iza filtra, treba da bude što je moguće manje da bi se ulazni signal filtra prenio na njegov izlaz bez slabljenja. Ako je $\alpha = 1$, to znači da je izlazni napon filtra (U_2) jednak ulaznom naponu filtra (U_1).

Prilikom uvođenja matematičke definicije slabljenja, primijetili smo da je riječ o odnosu dva napona, pa se kao rezultat dobija neimenovani broj. Karakteristike električnih sklopova kao što su pojačanje i slabljenje, ne izražavaju se prostim odnosom odgovarajućih veličina (napona, struja, snaga), već njihovim logaritamskim odnosom.

Slabljenje filtra je:

$$\alpha = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \text{ [dB]} \quad (3.13).$$

Primjer 3.4. Pretpostavimo da je $U_1 = 16 \text{ mV}$, a $U_2 = 4 \text{ mV}$. Izračunaj slabljenje filtra.

Rješenje:

Slabljenje filtra je:

$$\alpha = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log \frac{16 \text{ mV}}{4 \text{ mV}} = 20 \log 4 = 20 \cdot 0,6 = 12 \text{ dB.} \quad \blacksquare$$

Impedansa kola definiše se kao ukupna otpornost koju električno kolo pruža prolasku naizmenične struje. Impedansa je kompleksna veličina, i zavisi od otpornosti (R), kapacitivnosti (C), induktivnosti (L) i kružne učestanosti: $\omega = 2\pi f$.

Ulazna impedansa filtra predstavlja količnik ulaznog napona i ulazne struje u filter:

$$Z_{ul} = \frac{U_{ul}}{I_{ul}} \quad (3.14).$$

Ulazna impedansa filtra zavisi od učestanosti ulaznog signala. Ako je ulazna impedansa velika za signale niskih učestanosti, a mala za signale visokih učestanosti, onda će filter propuštati signale visokih učestanosti, a prigušivati signale niskih. I obrnuto: ako je ulazna impedansa mala za signale niskih učestanosti, a velika za signale visokih učestanosti, onda će filter propuštati signale niskih a prigušivati signale visokih učestanosti. Dakle, od ulazne impedanse zavisi propusni opseg filtra. Ovo ćemo kasnije detaljno izučiti.

Izlazna impedansa filtra predstavlja količnik napona i struje na izlazu filtra:

$$Z_i = \frac{U_{izl}}{I_{izl}} \quad (3.15).$$

Važnost izlazne impedanse kao parametra proizilazi iz činjenice da se električni filtri završavaju nekim električnim sklopovima koji takođe imaju neku impedansu, i da od odnosa tih impedansi zavisi prenos snage signala između filtra i tog sklopa. U elektrotehnici se pokazuje da se ostvaruje maksimalan prenos snage kada je izlazna otpornost filtra jednaka ulaznoj otpornosti sklopa koji se priključuje na izlaz filtra.

DODATAK +

U teoriji električnih kola, važnu veličinu predstavlja još jedan tip impedansi, a to je **karakteristična impedansa** (Z_c). Ova veličina uvedena je za potrebe projektovanja vodova kojima se prenosi električna energija. Odnos napona i struje u bilo kojoj tački beskonačnog homogenog voda je konstantan, i predstavlja karakterističnu impedansu voda. Karakteristična impedansa voda može se definisati i kao impedansa kojom treba završiti vod da bi ulazna impedansa voda bila jednaka njoj samoj. Po analogiji sa vodovima, uvodi se i karakteristična impedansa kola, kao impedansa kojom treba završiti kolo kako bi ulazna impedansa kola bila jednaka toj impedansi.

3.3.3. Pasivni filtri

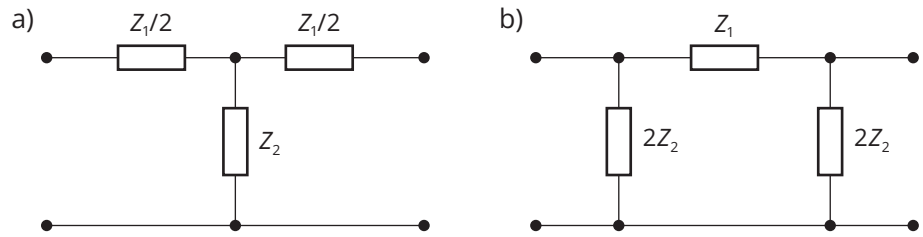
Električni filtri predstavljaju mreže koje se dobijaju međusobnim spajanjem – kaskadnim povezivanjem više četvoropola. Četvoropoli se obično realizuju kao simetrični Π i T četvoropoli, koji se nazivaju ćelije. Četvoropoli su simetrični ako im je moguće povući osu simetrije tako da obje strane četvoropola podijeljene tom osom budu jednake.

Da bi se dobilo potrebno slabljenje filtra, obično se kaskadno povezuje više filtarskih ćelija. Svaka ćelija ima svoje slabljenje. Ako su slabljenja filtarskih ćelija data kao brojevi bez dimenzija, onda se ukupno slabljenje filtra dobija kao proizvod slabljenja pojedinih filtarskih ćelija, i takođe je bezdimenziona veličina. Ako su slabljenja filtarskih ćelija data u decibelima, onda se ukupno slabljenje dobija kao zbir slabljenja svih pojedinačnih filtarskih ćelija i ima dimenziju u decibelima.

Na slici 3.21 prikazan je izgled T i Π ćelije simetričnih četvoropola. Radi lakšeg proračuna filtarske ćelije, vrijednosti impedansi definišu se kao vrijednosti $Z_1/2$ i $2Z_2$.

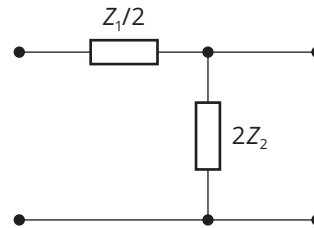
NAPOMENA

T, Π i L ćelije dobile su nazive prema izgledu filtra koji liči na navedena slova.



Slika 3.21 a) T i b) Π ćelija simetričnih četvoropola

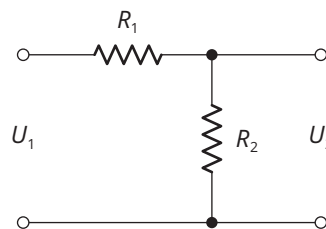
Osnovni element od kojeg se izgrađuju ćelije filtera jeste polućelija L, čiji je izgled prikazan na slici 3.22.



Slika 3.22. L-polućelija

Impedanse u rednim granama filtra označene su sa Z_1 , dok su impedanse u paralelnim granama filtra označene sa Z_2 . Impedanse u rednoj i paralelnoj grani L-polućelije imaju vrijednosti $\frac{Z_1}{2}$ i $2Z_2$ kako bi impedansa redne grane u bilo kojoj T i Π ćeliji bila Z_1 , a impedansa paralelne grane (ili grana) bila Z_2 . Na ovaj način znatno se olakšava teorijska analiza filtera.

Na slici 3.23 prikazano je električno kolo, koje je istog oblika kao L-polućelija filtra sa slike.3.22.



Slika 3.23. L-polućelija sa otpornicima

Kolo sa slike predstavlja razdjelnik napona:

$$U_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_2.$$

Imajući u vidu definiciju slabljenja, može se zaključiti da izraz $\alpha = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ predstavlja slabljenje kola sa slike. Vrijednost slabljenja može se podešavati izborom vrijednosti otpornika R_1 i R_2 .

NAPOMENA

Naponski razdjelnik je pasivno električno kolo čiji izlazni napon predstavlja dio ulaznog napona, pri čemu je izlazni napon uvijek manji od ulaznog. Kolo razdjelnika napona najčešće sadrži dva otpornika. Vrijednosti otpornika zavise od željene vrijednosti izlaznog napona i vrijednosti ulaznog napona.

Primjer 3.5.

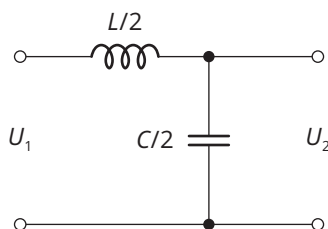
Odrediti slabljenje kola sa slike 3.23 ako je vrijednost otpornika:
a) $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$
b) $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$.

Rješenje:

a) $a = 2$
b) $a = 5$

Kako otpornost otpornika ne zavisi od učestanosti, tako ni slabljenje kola sa otpornicima ne zavisi od učestanosti.

Posmatrajmo sada šta se dešava u kolu ako se umjesto otpornika R_1 stavi kalem, a umjesto otpornika R_2 kondenzator. Radi lakšeg proračuna filterske ćelije, vrijednosti induktivnosti i kapacitivnosti definišu se kao vrijednosti $L/2$ i $C/2$. Na slici 3.24 prikazana je L-polučelija sa kalemom i kondenzatorom (slika 3.24).

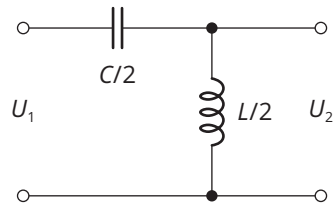


Slika 3.24. L-polučelija sa kalemom i kondenzatorom

Kako otpornosti kalema i kondenzatora u kolu naizmjenične struje zavise od učestanosti, tako će i slabljenje ovog kola zavisiti od učestanosti.

Pretpostavimo da su naponi na ulazu i na izlazu kola jednakih amplituda, da napon na ulazu ima učestanost f_1 , a napon na izlazu kola učestanost f_2 , pri čemu je $f_1 < f_2$. Očigledno je da struja na ulazu kola (koju generiše ulazni napon) takođe ima učestanost f_1 , dok struja na izlazu kola (koju generiše izlazni napon) ima učestanost f_2 . Otpornost kalema za struju manje učestanosti biće manja od otpornosti za struju veće učestanosti. Za otpornost kondenzatora biće obrnuto: kondenzator pruža veći otpor struji manje učestanosti. Kao što smo objasnili u uvodnom dijelu udžbenika, induktivna otpornost kalema direktno je proporcionalna učestanosti ($X_L = \omega L$), dok je kapacitivna otpornost kondenzatora obrnuto proporcionalna učestanosti ($X_C = \frac{1}{\omega C}$). Zbog toga će napon više učestanosti biti više oslabljen od napona niže učestanosti. Zaključujemo da je kolo sa slike – filter koji napone viših učestanosti slabi više od napona nižih učestanosti. Zbog toga ovo kolo predstavlja filter niske učestanosti, ili niskopropusni (NF) filter.

Ako bi se kalemu i kondenzatoru sa slike 3.24 zamijenila mjesta, dobilo bi se kolo kao na slici 3.25.



Slika 3.25. L-polućelija sa kondenzatorom i kalemom

Za napone niže učestanosti, otpornost kondenzatora u rednoj grani kola biće veća od otpornosti u paralelnoj, tako da će se ovo kolo ponašati kao filter koji više slabi napone nižih od napona viših učestanosti. Ovo kolo predstavlja filter visokih učestanosti, ili visokopropusni (VF) filter.

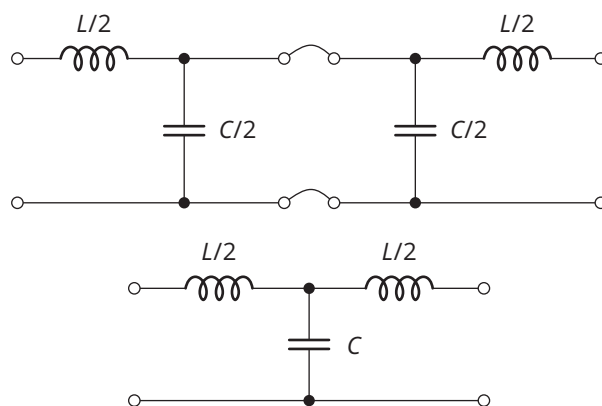
3.3.3.1. Filtri propusnici niskih učestanosti

Filtri propusnici niskih učestanosti (NF filtri) jesu električna kola koja napone učestanosti u opsegu od nule (jednosmjerna struja) do neke određene učestanosti f_c (što odgovara ranijoj oznaci f_N ili f_D) propuštaju bez slabljenja, dok oslabljuju napone čije su učestanosti veće od f_c .

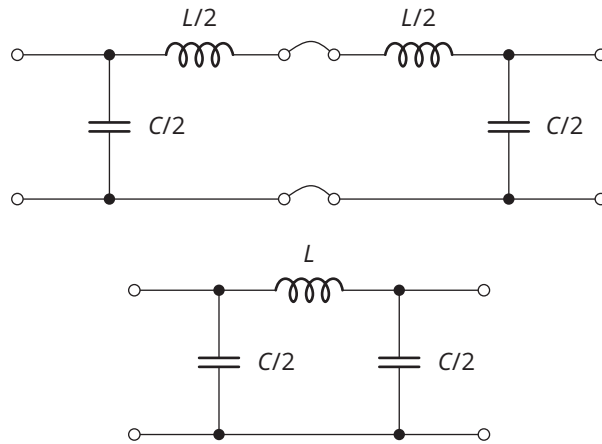
Učestanost f_c predstavlja **graničnu učestanost NF filtra**.

Kolo na slici 3.25, koje čini kalem induktivnosti $L/2$ i kondenzator kapaciteta $C/2$, naziva se **polućelija NF filtra**.

Vezivanjem dvije polućelije NF filtra na načine prikazane na slikama 3.26 i 3.27 (kaskadno povezivanje) dobija se T, odnosno Π ćelija NF filtra.



Slika 3.26. T-ćelija NF filtra

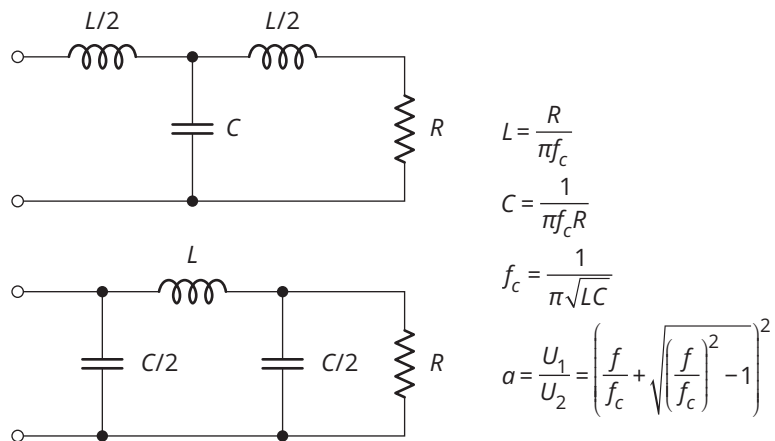


Slika 3.27. Π -ćelija NF filtra

Proračun vrijednosti parametara filtra, odnosno određivanje njegovih karakteristika, zavisi od njegove granične učestanosti. Osim induktivnosti kalema i kapacitivnosti kondenzatora, u parametre filtra mora se uračunati i otpornost stepena na koji se filter priključuje. Naime, električni filtri vezuju se između različitih sklopova električnih uređaja. Uređaji na koji se vode signali sa izlaza električnog filtra, imaju neku **ulaznu otpornost**, koja se označava sa R . Na primjer, ako se izlaz filtra priključuje na neki zvučnik otpornosti $5\ \Omega$, onda je $R = 5\ \Omega$, a ako se izlaz filtra priključuje na neko pojačalo ulazne otpornosti $5\ \text{k}\Omega$, onda je $R = 5\ \text{k}\Omega$.

Postupak izvođenja jednačina za parametre filtra je komplikovan, i prevazi-lazi znanje učenika srednje škole. Zbog toga su na slici 3.28 samo navedene formule za određivanje najvažnijih karakteristika NF filtra.

U lijevom dijelu slike prikazani su izgledi ćelija NF filtra u izvedbama sa dva kalema (T-ćelija – gornja slika), odnosno dva kondenzatora (Π -ćelija – donja slika) koje su priključene na električni uređaj zadate ulazne otpornosti. Na desnoj strani slike date su formule za izračunavanje osnovnih parametara NF filtra.



Slika 3.28. Osnovni parametri NF LC filtra

NAPOMENA

Ako se dvije ili više ćelija filtra povežu redno (kaskadno vezivanje), ukupno slabljenje ovakvog filtra, u decibelima, jednako je zbiru slabljenja svih ćelija. Kako su karakteristike filtara T i Π iste, u praksi se koriste oni koji za dati slučaj daju bolji rezultat.

Za datu vrijednost otpora (R) i zadatu vrijednost granične učestanosti (f_c) mogu se izračunati vrijednosti L i C prema prvim dvjema formulama sa slike. Ako su L i C poznati, onda se granična učestanost filtra računa po trećoj formuli sa slike. Slabljenje filtra na nekoj učestanosti (f) računa se po četvrtoj formuli sa slike.

Primjer 3.6. Najviša učestanost signala koji se prenosi telefonskom linijom jeste 3400 Hz. Odsijecanje viših frekvencija koje nastaju pri govoru, vrše NF filtri. Ako je otpornost potrošača 600 Ω , odrediti:

- induktivnost kalema i kapacitivnost kondenzatora filtra
- slabljenje signala na učestanosti 3500 Hz
- slabljenje signala na učestanosti 4000 Hz.

Izvesti odgovarajući zaključak u vezi sa slabljenjem signala u propusnom i nepropusnom opsegu NF filtra.

Rješenje:

Koristeći izraze sa slike 3.28, imamo da su:

$$a) L = \frac{R}{\pi f_c} = \frac{600 \Omega}{3,14 \cdot 3400 \text{ Hz}} = 56 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{\pi f_c R} = \frac{1}{3,14 \cdot 3400 \text{ Hz} \cdot 600 \Omega} = 156 \text{ nF}$$

$$b) a = \frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1} \right)^2 = \left(\frac{3500 \text{ Hz}}{3400 \text{ Hz}} + \sqrt{\left(\frac{3500 \text{ Hz}}{3400 \text{ Hz}}\right)^2 - 1} \right)^2 = 1,6.$$

Slabljenje u decibelima će biti:

$$a \text{ [dB]} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \cdot \log 1,6 = 20 \cdot 0,2 = 4,1 \text{ dB}$$

$$c) a = \frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1} \right)^2 = \left(\frac{4000 \text{ Hz}}{3400 \text{ Hz}} + \sqrt{\left(\frac{4000 \text{ Hz}}{3400 \text{ Hz}}\right)^2 - 1} \right)^2 = 3,23.$$

Slabljenje u decibelima će biti:

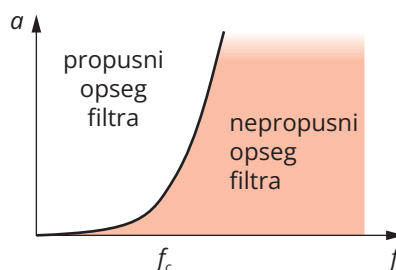
$$a \text{ [dB]} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 20 \cdot \log(3,23) = 20 \cdot 0,51 = 10,18 \text{ dB}.$$

Zaključak: Signal učestanosti koja je nešto veća od granične učestanosti NF filtra, u odnosu na signal učestanosti koji je takođe veći od granične učestanosti NF filtra oslabio je

$$\frac{3,23}{1,6} = 2 \text{ puta,}$$

ili za 10,18 dB – 4,1 dB = 6,13 dB.

Na slici 3.29 prikazana je zavisnost slabljenja NF filtra od učestanosti.



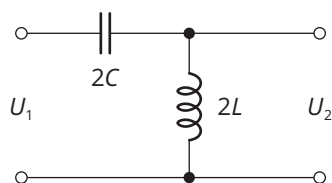
Slika 3.29. Zavisnost slabljenja NF filtra od učestanosti

3.3.3.2. Filtri propusnici visokih učestanosti

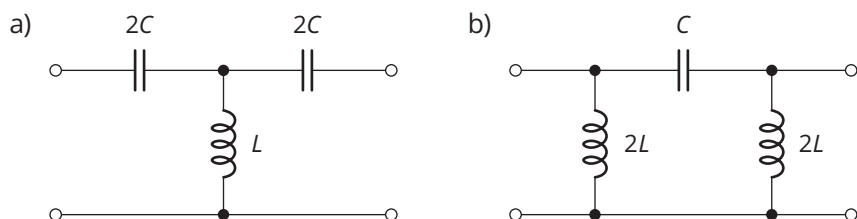
Filtri propusnici visokih učestanosti (VF filtri) jesu električna kola koja napone učestanosti veće od neke određene učestanosti f_c (koja odgovara ranijim oznakama f_V ili f_G) propuštaju sa minimalnim slabljenjem (u idealnom slučaju slabljenje je nula), dok napone čije su učestanosti manje od f_c maksimalno slabe.

Učestanost f_c predstavlja **graničnu učestanost VF filtra**.

Kolo na slici 3.30, koje čini kalem induktivnosti $2L$ i kondenzator kapaciteta $2C$, naziva se **polućelija VF filtra**. Vezivanjem dvije polućelije VF filtra na načine prikazane na slici 3.31 (kaskadno povezivanje) dobija se T, odnosno Π ćelija VF filtra. Vrijednosti kapacitivnosti i induktivnosti definišu se kao vrijednosti $2C$ i $2L$ radi lakšeg proračuna filtarske ćelije.

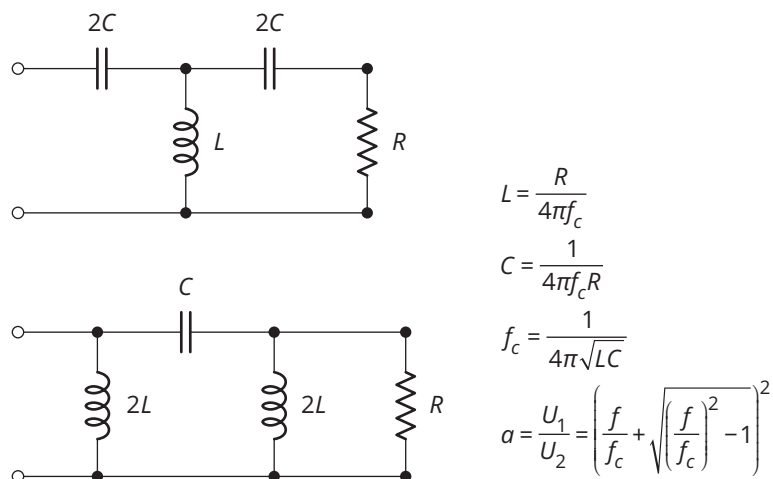


Slika 3.30. Polućelija VF filtra



Slika 3.31. a) T-ćelija b) Π -ćelija VF filtra

Na desnoj strani slike 3.32 date su formule za određivanje najvažnijih karakteristika VF filtra.



Slika 3.32. Osnovni parametri VF LC filtra

Primjer 3.7.

Slabljenje VF filtra na učestanosti 7 kHz iznosi 32 dB. Odrediti graničnu učestanost filtra.

Rješenje:

$$a \text{ [dB]} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 32 \text{ dB} \Rightarrow \log \frac{U_1}{U_2} = 1.6 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = 10^{1.6} = 40$$

Graničnu učestanost filtra odredit ćemo iz relacije:

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1} \right)^2 \Rightarrow 40 = \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1} \right)^2.$$

Korjenovanjem lijeve i desne strane jednačine dobija se da je:

$$6,31 = \frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1} \Rightarrow \left(6,31 - \frac{f}{f_c} \right) = \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1}.$$

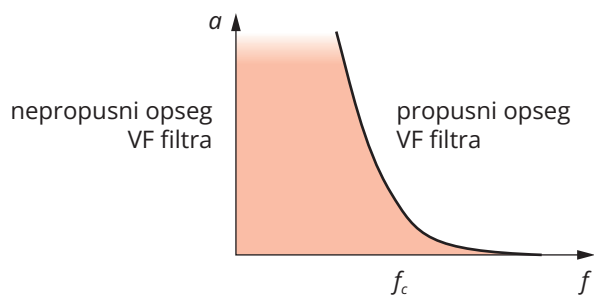
Kvadriranjem lijeve i desne strane jednačine dobija se:

$$\left(6,31 - \frac{f}{f_c} \right)^2 = \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1.$$

Rješavanjem kvadratne jednačine dobija se da je:

$$\frac{f}{f_c} = 3,25 \Rightarrow f_c = \frac{f}{3,25} = \frac{7000 \text{ Hz}}{3,25} = 2154 \text{ Hz.}$$

Na slici 3.33 prikazana je zavisnost slabljenja VF filtra od učestanosti.



Slika 3.33. Zavisnost slabljenja VF filtra od učestanosti

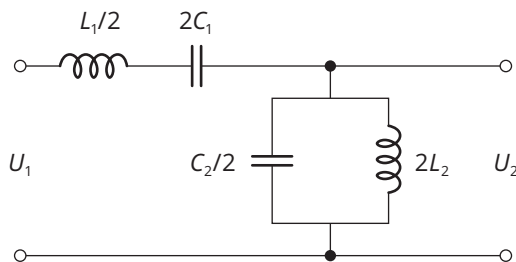
3.3.3.3. Filtri propusnici opsega učestanosti

U telekomunikacijama je čest slučaj da je potrebno prenijeti signal koji se nalazi u opsegu između dvije učestanosti (f_{c1} i f_{c2}), a sve ostale signale čije su učestanosti van ovog opsega treba oslabiti.

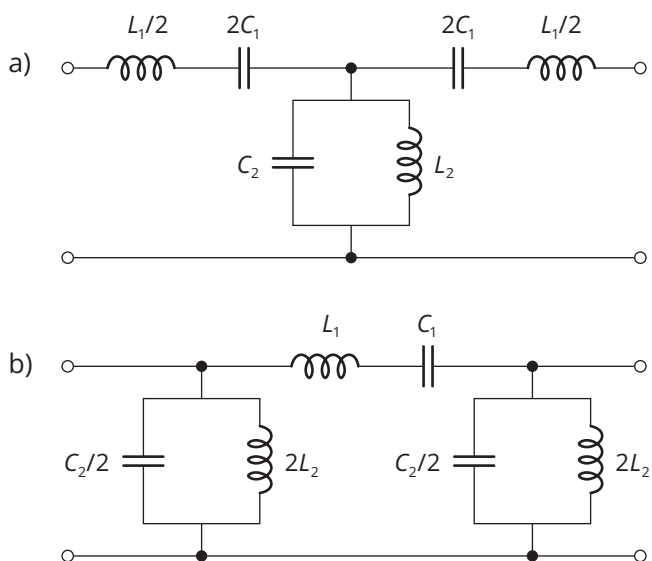
Filtri propusnici opsega učestanosti jesu električna kola koja napone čije su učestanosti između f_{c1} i f_{c2} propuštaju bez slabljenja, dok oslabljuju napone čije su učestanosti izvan toga opsega.

Učestanosti f_{c1} i f_{c2} predstavljaju **granične učestanosti filtra propusnika opsega učestanosti**.

Kolo na slici 3.34, koje čine redno vezani kalem induktivnosti $L_1/2$ i kondenzator kapaciteta $2C_1$ u rednoj grani, te paralelno vezani kondenzator kapaciteta $C_2/2$ i kalem induktivnosti $2L_2$ u paralelnoj grani filtra, naziva se **polućelija filtra propusnika opsega učestanosti**. Vezivanjem dvije polućelije filtra propusnika opsega učestanosti na načine prikazane na slici 3.35 (kaskadno povezivanje) dobija se T, odnosno Π ćelija filtra propusnika opsega učestanosti.

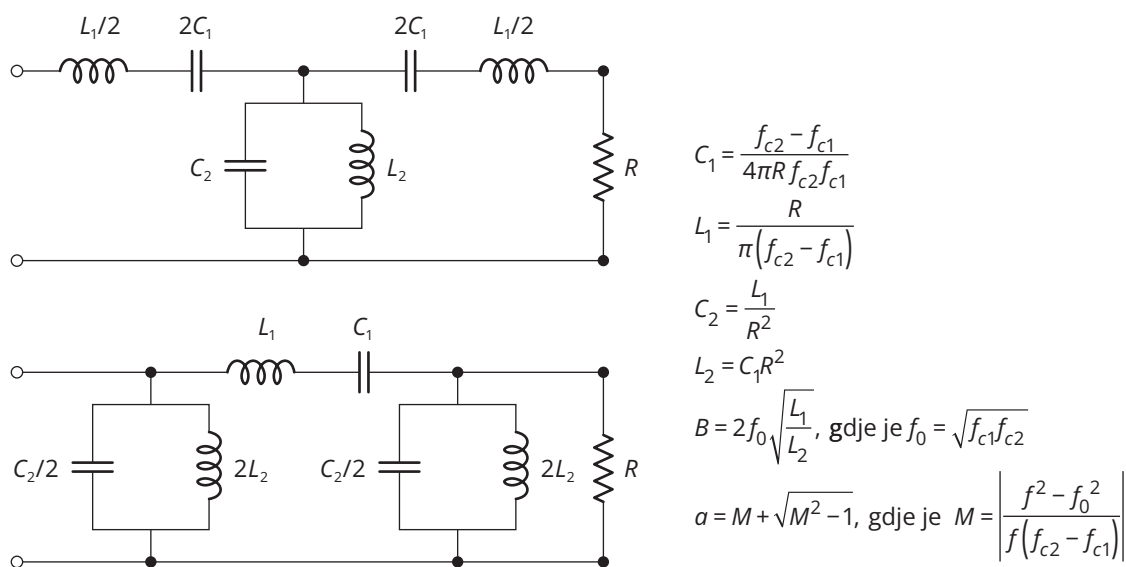


Slika 3.34. Polućelija filtra propusnika opsega učestanosti



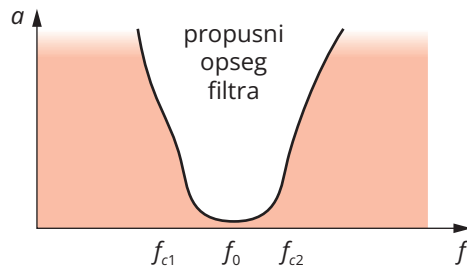
Slika 3.35. a) T-ćelija b) Π-ćelija filtra propusnika opsega učestanosti

Na desnoj strani slike 3.36 date su formule za određivanje najvažnijih karakteristika filtra propusnika opsega učestanosti, realizovanog kao LC T i Π ćelije. U prve četiri formule, sa R je označena ulazna otpornost stepena koji se priključuje na izlaz filtra. U petoj formuli računa se širina propusnog opsega filtra, koja je definisana kao razlika njegovih graničnih učestanosti: $B = f_{c2} - f_{c1}$. U petoj formuli f_0 predstavlja centralnu ili rezonantnu frekvenciju filtra propusnika opsega učestanosti, na kojoj je slabljenje signala koji se propušta kroz filter najmanje.



Slika 3.36. Osnovni parametri LC filtra propusnika opsega učestanosti

Na slici 3.37 prikazana je zavisnost slabljenja filtra propusnika opsega učestanosti od frekvencija.



Slika 3.37. Zavisnost slabljenja filtra propusnika opsega učestanosti od učestanosti

Primjer 3.8.

Električno kolo stvara napone u obliku povorke pravougaonih impulsa čija je učestanost 3 kHz. Prvi harmonik toga napona ima učestanost 3 kHz, drugi 6 kHz, treći 9 kHz itd. Na kolo je priključen filter čiji je zadatak da izdvoji harmonike tako da se na izlazu filtra dobije sinusoidalni napon učestanosti 6 kHz. Ako je filter realizovan kao T-čelija sa slike 3.36, proračunati vrijednost elemenata filtra. Propusni opseg filtra treba da bude 500 Hz. Ulazna otpornost stepena na koji se vode signali sa izlaza filtra jeste 2 kΩ.

Rješenje:

Filter čiji je propusni opseg 0,5 kHz treba da propušta napon učestanosti 6 kHz. Njegove granične frekvencije dobiće se tako što se učestanosti 6 kHz doda ili oduzme vrijednost od polovine propusnog opsega B:

$$f_{c1} = 6 \text{ kHz} - 0,25 \text{ kHz} = 5,75 \text{ kHz}$$

$$f_{c2} = 6 \text{ kHz} + 0,25 \text{ kHz} = 6,25 \text{ kHz}$$

Na osnovu dobijenih vrijednosti, propusni opseg filtra ima vrijednost kao i u postavci zadatka:

$$B = f_{c2} - f_{c1} = 6,25 \text{ kHz} - 5,75 \text{ kHz} = 0,5 \text{ kHz} = 500 \text{ Hz}$$

Zamjenom datih vrijednosti u formule iz tabele, dobijamo da je:

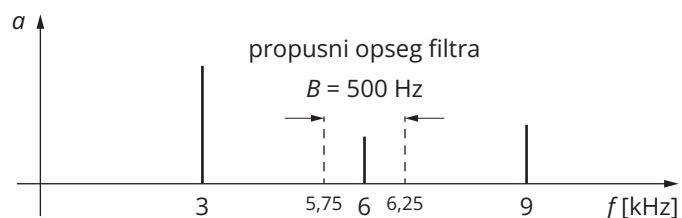
$$L_1 = \frac{R}{\pi(f_{c2} - f_{c1})} = \frac{2 \cdot 10^3 \Omega}{3,14 \cdot 500 \text{ Hz}} = 1,27 \text{ H}$$

$$C_1 = \frac{f_{c2} - f_{c1}}{4\pi R f_{c2} f_{c1}} = \frac{500 \text{ Hz}}{4 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^3 \Omega \cdot 5,75 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 6,25 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 550 \text{ pF}$$

$$L_2 = C_1 R^2 = 550 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot (2 \cdot 10^3 \Omega)^2 = 2,2 \text{ mH}$$

$$C_2 = \frac{L_1}{R^2} = \frac{1,27 \text{ H}}{(2 \cdot 10^3 \Omega)^2} = 320 \text{ nF}$$

Slika 3.38 ilustruje navedene opsege iz primjera 3.8.



Slika 3.38. Propusni opseg filtra iz primjera 3.8

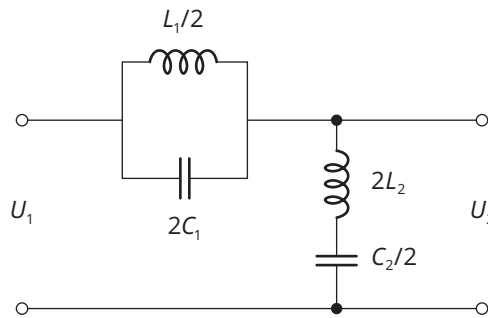
3.3.3.4. Filtri nepropusnici opsega učestanosti

U telekomunikacionim uređajima čest je slučaj da je potrebno prigušiti signal koji se nalazi u opsegu između dvije učestanosti (f_{c1} i f_{c2}) i ne dozvoliti mu prelazak na neki sljedeći stepen telekomunikacionog sistema, pri čemu se svi ostali signali čije su učestanosti van ovog opsega mogu propustiti na sljedeći stepen. To se ostvaruje pomoću filtra nepropusnika opsega učestanosti.

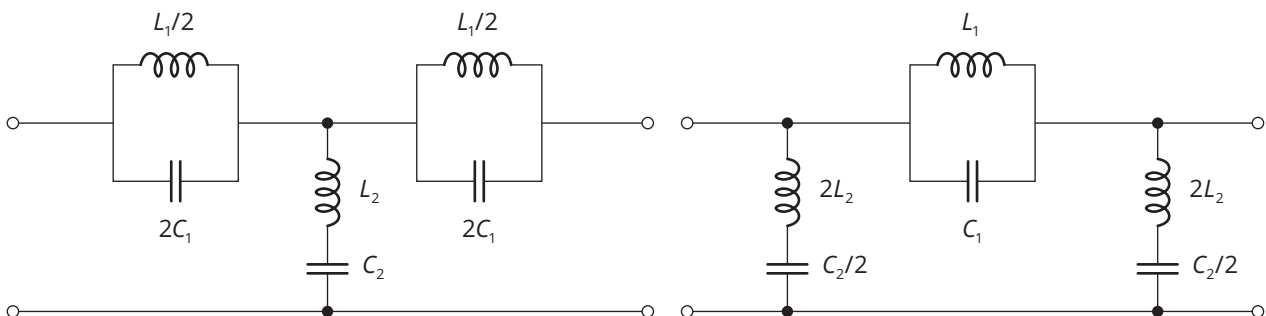
Filtri nepropusnici opsega učestanosti jesu električna kola, koja napone čije su učestanosti između f_{c1} i f_{c2} slabe (prigušuju), dok napone čije su učestanosti izvan toga opsega propuštaju bez slabljenja.

Učestanosti f_{c1} i f_{c2} predstavljaju **granične učestanost filtra nepropusnika opsega učestanosti**.

Kolo na slici 3.39, koje čine paralelno vezani kalem induktivnosti $L_1/2$ i kondenzator kapaciteta $2C_1$ u rednoj grani, te redno vezani kondenzator kapaciteta $C_2/2$ i kalem induktivnosti $2L_2$ u paralelnoj grani filtra, naziva se **polućelija filtra nepropusnika opsega učestanosti**. Vezivanjem dvije polućelije filtra propusnika opsega učestanosti na načine prikazane na slici 3.40 (kaskadno povezivanje) dobija se T, odnosno Π ćelija filtra nepropusnika opsega učestanosti.

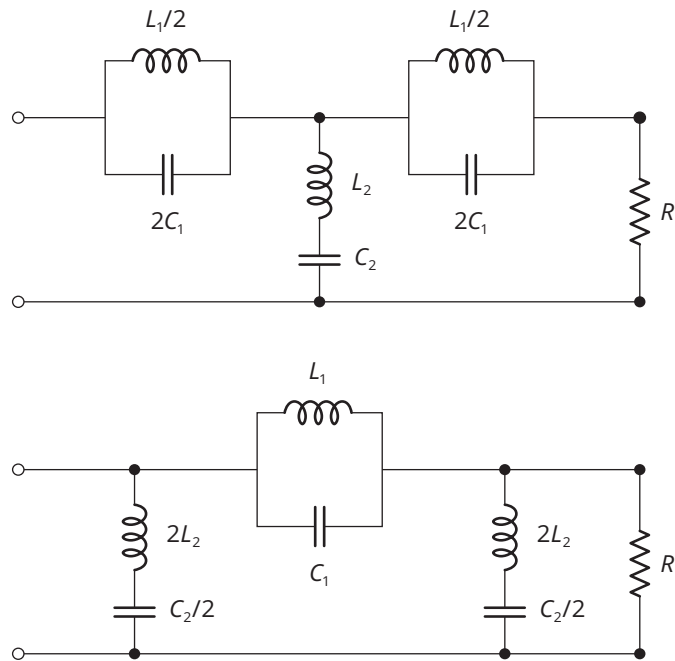


Slika 3.39. Polućelija filtra nepropusnika opsega učestanosti



Slika 3.40. T i Π ćelija filtra nepropusnika opsega učestanosti

Na desnoj strani slike 3.41 date su formule za određivanje najvažnijih karakteristika filtra nepropusnika opsega učestanosti, realizovanog kao LC T i Π ćelije. Prve četiri formule omogućuju računanje nepoznatih kapacitivnosti kondenzatora C_1 i C_2 , kao i induktivnosti kalemova L_1 i L_2 . U datim izrazima sa R je označena ulazna otpornost stepena koji se priključuje na izlaz filtra. Po petoj formuli računa se širina nepropusnog opsega filtra. U šestoj formuli f_0 predstavlja centralnu ili rezonantnu frekvenciju filtra nepropusnika opsega učestanosti, na kojoj je slabljenje signala koji se propušta kroz filter najveće.



$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{c1} f_{c2} L_1}$$

$$L_1 = \frac{R(f_{c2} - f_{c1})}{\pi f_{c1} f_{c2}}$$

$$C_2 = \frac{L_1}{R^2}$$

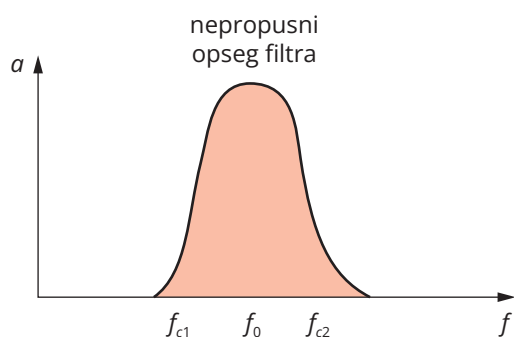
$$L_2 = C_1 R^2$$

$$B = \frac{f_0}{2} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}, \text{ gdje je } f_0 = \sqrt{f_{c1} f_{c2}}$$

$$a = M + \sqrt{M^2 - 1}, \text{ gdje je } M = \left| \frac{f(f_{c2} - f_{c1})}{f(f^2 - f_0^2)} \right|$$

Slika 3.41. Osnovni parametri LC filtra nepropusnika opsega učestanosti

Na slici 3.42 prikazana je zavisnost slabljenja filtra propusnika opsega učestanosti od frekvencija. Isprekidana linija prikazuje slabljenje idealnog, a puna slabljenje realnog filtra.



Slika 3.42. Zavisnost slabljenja filtra propusnika opsega učestanosti od učestanosti

Primjer 3.9.

LC filtar nepropusnik opsega učestanosti realizovan kao T ili Π ćelija sa slike 3.40, slabi signale čije su učestanosti između 9 i 12 kHz. Koliko je slabljenje signala čija je učestanost 11 kHz?

Rješenje:

Koristeći formule sa slike 3.40 dobijamo da je:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1}f_{c2}} = \sqrt{9 \cdot 10^3 \text{ kHz} \cdot 12 \cdot 10^3 \text{ kHz}} = 10,4 \text{ kHz.}$$

$$f_{c2} - f_{c1} = 12 \text{ kHz} - 9 \text{ kHz} = 3 \text{ kHz}$$

$$f = 11 \text{ kHz}$$

$$M = \left| \frac{f(f_{c2} - f_{c1})}{f^2 - f_0^2} \right| = \left| \frac{10 \cdot 10^3 \text{ kHz} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ kHz}}{(11 \cdot 10^3 \text{ kHz})^2 - (10,4 \cdot 10^3 \text{ kHz})^2} \right| = 2,33.$$

$$\alpha = M + \sqrt{M^2 - 1} = 2,33 + \sqrt{2,33^2 - 1} = 4,43.$$

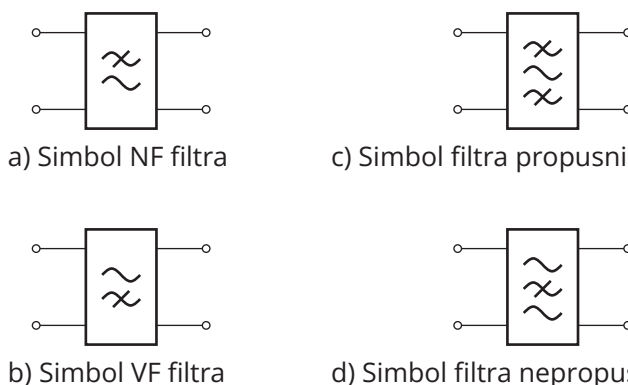
Dakle, signal je oslabljen 4,43 puta.

Slabljenje u decibelima je: $\alpha \text{ [dB]} = 20 \log 4,43 = 13 \text{ dB}$.

NAPOMENA

U električnim šemama, za svaku vrstu filtra unose se i konkretne vrijednosti graničnih frekvencija. Tako, na primjer, NF filtar koji ograničava signale na ulazu u telefonski kanal ima graničnu frekvenciju $f_c = f_g = 4 \text{ kHz}$.

U električnim šemama filtri se prikazuju na način prikazan na slici 3.43.

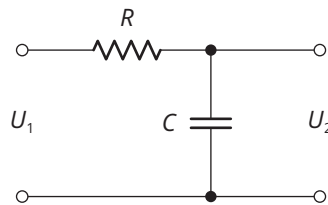


Slika 3.43. Način prikazivanja filtara u električnim šemama

3.3.3.5. RC filtri

U praktičnoj realizaciji LC filtara, najskuplju i najglomazniju komponentu filtra predstavlja kalem. Taj problem naročito je izražen kada treba filtrirati signale nižih frekvencija, kao što su audio-signalni. Zbog toga se u ovim slučajevima izrađuju RC filtri, koji ne sadrže kalemove, već samo otpornike i kondenzatore.

Najprostiji element RC filtra propusnika niskih učestanosti jeste polučelija RC filtra prikazana na slici 3.44.



Slika 3.44. Polučelija RC filtra propusnika niskih učestanosti

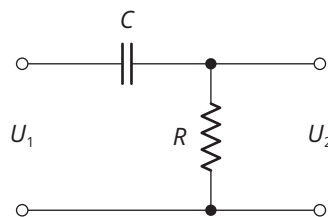
Pokazuje se da je granična učestanost ovog filtra:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.16).$$

Slabljenje, u decibelima, filtra na bilo kojoj učestanosti f jeste:

$$a \text{ [dB]} = 10 \log \left(1 + (2\pi f RC)^2 \right) \quad (3.17).$$

Polučelija RC filtra propusnika visokih učestanosti prikazana je na slici 3.45.



Slika 3.45. Polučelija RC filtra propusnika visokih učestanosti

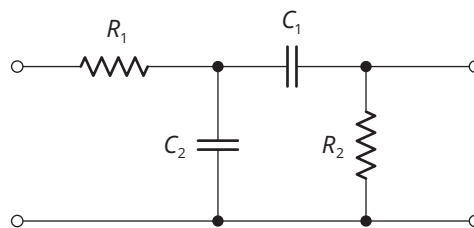
Pokazuje se da je granična učestanost RC VF filtra:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.18)$$

Slabljenje, u decibelima, filtra na bilo kojoj učestanosti f jeste:

$$a \text{ [dB]} = 10 \log \left(1 + (2\pi f RC)^2 \right) \quad (3.19).$$

RC filtri propusnici opsega učestanosti ostvaruju se kaskadnim vezivanjem propusnika visokih i propusnika niskih učestanosti (slika 3.46).



Slika 3.46. RC filter propusnik opsega učestanosti

Ako je $f_{c2} > 10f_{c1}$, što je čest slučaj u praksi, tada je međusobni uticaj kaskadno povezanih filtera mali, pa je donja granična učestanost f_{c1} jednaka graničnoj učestanosti VF filtera, dok je gornja učestanost f_{c2} jednaka graničnoj učestanosti NF filtera.

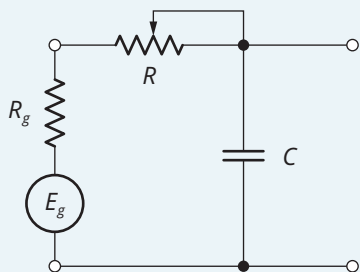
Centralna učestanost ovoga filtera f_0 je: $\sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}}$.

DODATAK +

U svim formulama za granične učestanosti RC kola pojavljuje se izraz RC . Ovaj proizvod ima dimenziju vremena, a naziva se vremenska konstanta kola. Vremenskom konstantom kola često se definišu osobine nekog električnog kola, prije svega brzina reakcije (odziv) kola na neki ulazni napon (pobudu).

Primjer 3.10.

Na slici 3.47 prikazano je najprostije kolo za regulaciju boje tona u audio-pojačalima. Elektromotorna sila i unutrašnja otpornost stepena sa koga se signal vodi na ulaz filtera jesu E_g i $R_g = 10 \text{ k}\Omega$. Odrediti vrijednosti R i C , tako da granična učestanost filtera bude 15 kHz kada je klizač promjenljivog otpornika u krajnje lijevom položaju, a 3 kHz kada je klizač u krajnje desnom položaju.



Slika 3.47. Kolo za regulaciju boje tona

Rješenje: Filter na slici 3.47 predstavlja propusnik niskih učestanosti, čija granična učestanost može da se mijenja u zavisnosti od vrijednosti otpora potencijometra. Kada je klizač potencijometra u krajnje lijevom položaju, otpor potencijometra jednak je nuli, pa je tada ukupan otpor kola $R_g = 10 \text{ k}\Omega$. U tom slučaju je:

$$C = \frac{1}{2\pi R f_c} = 1,1 \text{ nF.}$$

Kada je klizač potencijometra u krajnje desnom položaju, tada je ukupna otpornost filtera $R_u = R + R_g$. U ovom slučaju je granična učestanost filtera: $f_c = 3 \text{ kHz}$, pa je:

$$R + R_g = \frac{1}{2\pi C f_c} = 53 \text{ k}\Omega,$$

odakle slijedi da je:

$$R = 53 \text{ k}\Omega - R_g = 53 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = 43 \text{ k}\Omega.$$

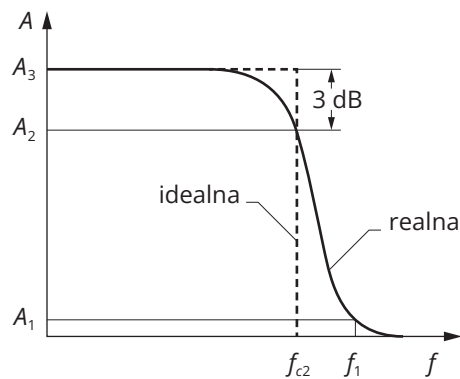
3.3.4. Aktivni filtri

Pasivni filtri, opisani u prethodnom odjeljku, nijesu pogodni za primjenu na nižim učestanostima. Za realizaciju LC filtara za niže učestanosti potrebni su kalemovi većih induktivnosti, odnosno većih dimenzija, koji su nepraktični za montažu na štampanim elektronskim pločama. Zbog toga se u filtrima koriste aktivne komponente – operacioni pojačavači.

3.3.4.1. Aktivni filtri – propusnici niskih učestanosti

Na slici 3.48 prikazana je funkcija prenosa aktivnog NF filtra. Na ordinati

grafika pojačanje filtra $A = \frac{U_2}{U_1}$, gdje je U_2 izlazni, a U_1 ulazni napon.



Slika 3.48. Funkcija prenosa aktivnog NF filtra

Idealni NF filtar bio bi onaj kod koga je pojačanje u propusnom opsegu konstantno, a u nepropusnom jednako nuli. Puna linija označava realnu (stvarnu), a isprekidana idealnu funkciju prenosa. Filtar sa idealnom karakteristikom nemoguće je napraviti. Zbog toga se u praksi u propusnom opsegu toleriše slabljenje filtra od 3 dB. Slabljenju od 3 dB odgovara odnos izlaznog i ulaznog napona od oko 1,41 ($\sqrt{2} = 1,41$), jer je:

$$3 \text{ dB} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{3}{20}} = 1,41.$$

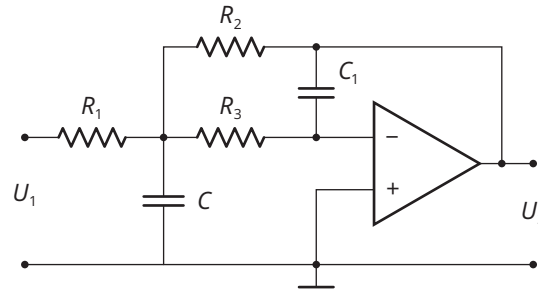
Slabljenju za 3 dB odgovara slabljenje idealnog filtra za oko 30%, jer je:

$$A_2 = \frac{A_3}{1,41} = 0,7 \cdot A_3 = 70\% \cdot A_3.$$

Aktivni filtri obično se realizuju kao integrisana kola sa operacionim pojačavačima. Na slici 3.49 prikazan je primjer aktivnog NF filtra.

R_1 i C obrazuju NF filtar. C_1 ima ulogu da formira povratnu spregu između izlaza i ulaza operacionog pojačavača. Stabilnost povratne sprege obezbjeđuje otpornik R_2 . Povratna sprega smanjuje pojačanje operacionog

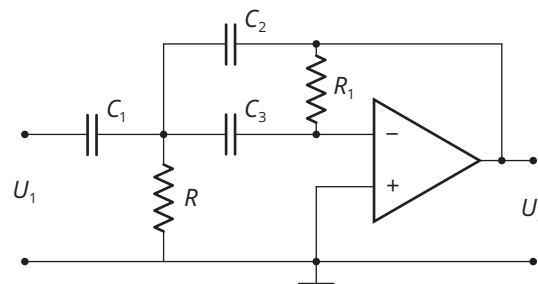
pojačavača. Što je učestanost signala veća, to se povećava i kapacitivna otpornost kondenzatora C_1 , pa je i povratna sprega jača. To praktično znači da se pojačanje operacionog pojačavača smanjuje povećanjem učestanosti signala. Na taj se način signali niskih učestanosti više pojačavaju u odnosu na signale viših učestanosti, odnosno kolo se ponaša kao NF filter.



Slika 3.49. Aktivni NF filter

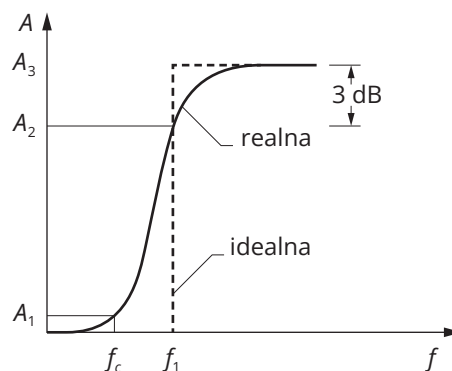
3.3.4.2. Aktivni filtri – propusnici visokih učestanosti

Jedan od načina realizacije aktivnog VF filtra prikazan je na slici 3.50. Lako se zapaža da ovo kolo predstavlja NF filter sa slike 3.49, u kojem su otpornici i kondenzatori zamijenili mjesta. Kolo na ulazu predstavlja RC VF filter. Ovaj signal se dalje pojačava u operacionom pojačavaču.



Slika 3.50. Aktivni VF filter

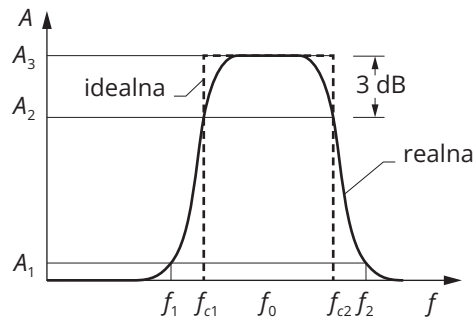
Funkcija prenosa aktivnog VF filtra prikazana je na slici 3.51.



Slika 3.51. Funkcija prenosa aktivnog VF filtra

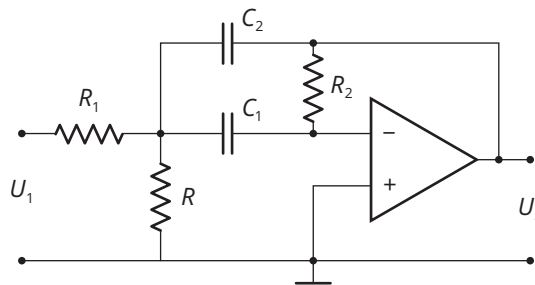
3.3.4.3. Aktivni filtri – propusnici opsega učestanosti

Funkcija prenosa filtra propusnika opsega učestanosti prikazana je na slici 3.52. Propusni opseg definiše se kao opseg učestanosti u kojem pojačanje nije manje od neke zadate vrijednosti. Na slici je to pojačanje označeno sa A_2 , a odgovarajući propusni opseg: $B = f_{c2} - f_{c1}$. Obično se uzima da je $A_2 = 0,7A_3$.



Slika 3.52. Funkcija prenosa aktivnog filtra propusnika opsega učestanosti

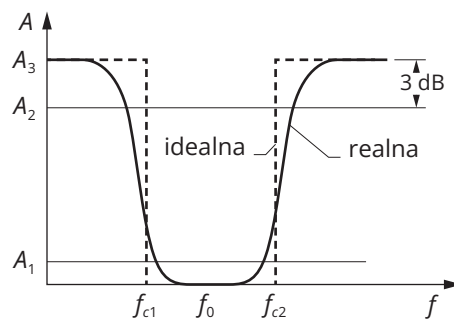
Na slici 3.53 prikazana je električna šema aktivnog filtra propusnika opsega učestanosti. Sa slike se zapaža da je ovo kolo kombinacija filtera NF i VF.



Slika 3.53. Aktivni filter propusnik opsega učestanosti

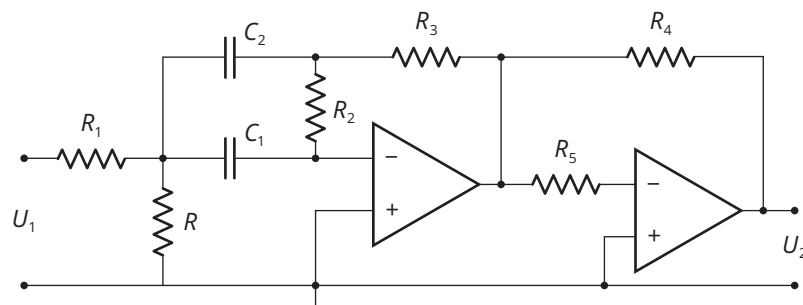
3.3.4.4. Aktivni filtri – nepropusnici opsega učestanosti

Funkcija prenosa ovog filtra prikazana je na slici 3.54. Propusni opseg filtra jeste opseg učestanosti u kojem pojačanje nije manje od neke zadate vrijednosti, koja je obično $A_2 = 0,7A_3$.



Slika 3.54. Funkcija prenosa aktivnog filtra nepropusnika opsega učestanosti

Jedna od mogućih realizacija aktivnog filtra nepropusnika opsega učestanosti prikazana je na slici 3.55.



Slika 3.55. Aktivni filtar nepropusnik opsega učestanosti

Za filtre propusnike i nepropusnike opsega učestanosti uvodi se veličina

faktor dobrote kola koja se označava sa Q , i ona je $Q = \frac{f_0}{B}$. Faktor dobrote

kola je fizička veličina koja opisuje rezonantna svojstva oscilatornog kola, i predstavlja odnos energije akumulirane u oscilatornom kolu i energije utrošene u jednom periodu. Niske vrijednosti faktora dobrote imaju oscilatori koji prestaju da osciluju ubrzo po prestanku djelovanja pobudne sile, a visoke oni koji dugo osciluju i nakon prestanka djelovanja pobudne sile. Veća vrijednost faktora dobrote omogućuje užu interval rezonantnih vrijednosti učestanosti i veću amplitudu.

Učestanost $f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}}$ naziva se kvazirezonantna učestanost filtra.

Primjer 3.11.

Za opseg govornog signala od 300 Hz do 3,4 kHz, izračunati faktor dobrote kola aktivnog filtra, propusnika opsega učestanosti.

Rješenje:

Da bi se dobio faktor dobrote kola Q , potrebno je prvo izračunati kvazirezonantnu učestanost filtra f_0 i propusni opseg filtra B . Koristeći prethodne izraze, mogu se dobiti željenije veličine, imajući u vidu da je $f_{c1} = 300$ Hz i $f_{c2} = 3,4$ kHz:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}} = \sqrt{300 \text{ Hz} \cdot 3400 \text{ Hz}} = 1010 \text{ Hz}$$

$$B = f_{c2} - f_{c1} = 3400 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz} = 3100 \text{ Hz}.$$

Faktor dobrote kola računa se kao količnik kvazirezonantne učestanosti filtra i propusnog opsega filtra:

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{1010 \text{ Hz}}{3100 \text{ Hz}} = 0,33.$$

Može se zaključiti da je funkcija prenosa aktivnog filtra propusnika opsega učestanosti strmija što je faktor dobrote kola veći, i obrnuto.

Rezime

- ▶ Sistemi za prenos mogu biti linearni i nelinearni. Linearni sistemi, za razliku od nelinearnih, obezbjeđuju linearnu zavisnost izlaznih i ulaznih veličina. Glavne karakteristike sistema za prenos jesu prenosna funkcija, amplitudska i fazna karakteristika, te propusni opseg.
- ▶ U sistemima za prenos uvijek se javljaju izobličenja signala. Osnovni uzrok pojave izobličenja jeste odstupanje od linearnosti sklopova za prenos signala, odnosno neidealnost karakteristika za prenos. Amplitudska izobličenja nastaju onda kada je amplitudska karakteristika zavisna od učestanosti, dok fazna izobličenja nastaju onda kada fazna karakteristika nije linearna funkcija učestanosti. U sistemima za prenos javljaju se istovremeno amplitudska i fazna izobličenja.
- ▶ U telekomunikacijama, korisni signal koji se prenosi uvijek prati šum. U zavisnosti od porijekla, šumovi se dijele na ambijentalne, šumove nastale usljed napajanja električnom energijom, atmosferske, termičke, intermodulacione i šumove nastale usljed preslušavanja.
- ▶ Električni filtri su električna kola kojima se razdvajaju signali različitih učestanosti. Mogu biti pasivni i aktivni. Pasivni filtri izrađuju se od pasivnih električnih komponenti (otpornici, kondenzatori, kalemovi) koje ne mogu pojačavati snagu signala koji se dovodi na njihov ulaz, a aktivni od elektronskih komponenti (tranzistori) koji mogu pojačavati snagu signala koji se dovodi na njihov ulaz.
- ▶ U zavisnosti od propusnog opsega, filtri se dijele u četiri grupe:
 1. propusnike opsega učestanosti koji propuštaju signale opsega između f_N i f_V ;
 2. nepropusnike opsega učestanosti koji ne propuštaju signale opsega između f_N i f_V ;
 3. propusnike niskih učestanosti koji propuštaju signale učestanosti od $f_N = 0$ do f_V ;
 4. propusnike visokih učestanosti koji propuštaju signale čije su učestanosti veće od f_V . Učestanosti f_N i f_V nazivaju se granične učestanosti filtera.
- ▶ Najvažnije osobine filtera opisuju se njegovim karakteristikama. Najznačajnije karakteristike filtera jesu granična učestanost, slabljenje i impedansa.

Manje poznate riječi

ekvivalent – stvar iste vrijednosti; rekombinacija – ponovno stvaranje električno neutralnih atoma od pozitivnih i negativnih čestica; distorzija – izobličenje, izvrtanje; kaskadan – raspoređen u nizu;

idealno – savršen; dominantan – onaj koji preovladava, najistaknutiji; ambijent – sredina, okolina, životni prostor.

Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko želiš produbiti znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *M. Filipović: Osnove telekomunikacija za drugi razred srednjeg obrazovanja za elektrotehničke*

škole, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998. u kojoj su detaljno obrađeni električni filtri koji se koriste u komunikacionim kolima.

Pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Definiši i objasni karakteristike sistema za prenos signala.
2. Navedi i objasni osnovne uzroke izobličenja signala.
3. Navedi i objasni uzroke osnovnih vrsta šumova koji se javljaju pri prenosu signala.
4. Na primjeru prenosa telefonskog signala objasni zbog čega šum razumljivog preslušavanja predstavlja veću smetnju od šuma nerazumljivog preslušavanja.
5. Navedi i objasni vrste električnih filtara.
- 6.* Napon na izlazu filtra jednak je naponu na ulazu filtra. Izračunaj pojačanje i slabljenje filtra u dB.

Rješenje: Kako je iz uslova zadatka izlazni napon filtra jednak ulaznom naponu, možemo pisati jednakost: $U_1 = U_2$, gdje je U_1 ulazni napon filtra a U_2 izlazni napon filtra. Slabljenje filtra u decibelima je:

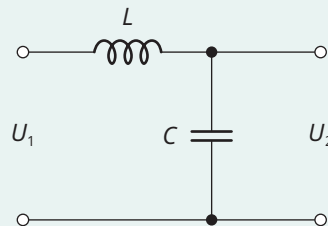
$$a \text{ [dB]} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 20 \log \frac{U_2}{U_2} = 20 \log 1 = 20 \cdot 0 = 0 \text{ dB.}$$

Pojačanje filtra u decibelima je:

$$A \text{ [dB]} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{U_2}{U_2} = 20 \log 1 = 20 \cdot 0 = 0 \text{ dB.}$$

Ako su naponi na ulazu i izlazu filtra isti, tada filter ne unosi ni slabljenje ni pojačanje.

- 7.* Izvedi izraz za graničnu frekvenciju L-polućelije niskofrekventnog filtra koji je dat na slici:



Rješenje: Pojačanje filtra u funkciji frekvencije definiše se kao odnos izlaznog i ulaznog napona. Izlazni i ulazni napon mogu se dobiti preko reaktivnih otpornosti kalema i kondenzatora X_C i X_L , pa je pojačanje filtra:

$$A(f) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{X_C}{X_L + X_C}.$$

Otpornosti kalema i kondenzatora mogu se izraziti kao funkcije frekvencije:

$$X_L = \omega L \text{ i } X_C = -\frac{1}{\omega C},$$

pa je pojačanje filtra:

$$A(f) = \frac{X_C}{X_L + X_C} = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{\frac{\omega^2 \cdot L \cdot C - 1}{\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C}.$$

Pojačanje je najveće ako je imenilac izraza jednak 0, i tada je slabljenje signala minimalno. To znači da vrijedi izraz:

$$1 - \omega^2 \cdot L \cdot C = 0,$$

iz čega slijedi da je granična frekvencija filtra:

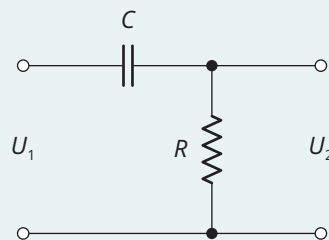
$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}},$$

što predstavlja Tomsonov obrazac.

Na sličan način može se izvesti izraz za graničnu frekvenciju L-polućelije visokofrekventnog filtra, koji se dobija tako što kalem i kondenzator zamijene svoja mjesta u električnoj šemi.

- 8.*** Izvedi izraz za graničnu frekvenciju L-polućelije filtra RC, propusnika visokih frekvencija.

Rješenje: Na sljedećoj slici data je L-polućelija RC filtra, koji propušta visoke frekvencije:



Slabljenje filtra može se definisati izrazom:

$$a(f) = \frac{U_1}{U_2} = \frac{X_C + R}{R} = \frac{-\frac{1}{\omega C} + R}{R} = \frac{-1 + \omega RC}{\omega C R} = \frac{-1 + \omega RC}{\omega CR}.$$

Slabljenje signala će biti 0 ako je brojilac u prethodnom izrazu 0:

$$-1 + \omega RC = 0.$$

Iz prethodnog izraza dobija se granična frekvencija filtra:

$$f_g = \frac{1}{2\pi CR}$$

- 9.* Ulazni napon sklopa (četvoropola) jeste $U_{ul} = 10 \text{ V}$, a ulazna struja $I_{ul} = 2 \text{ mA}$. Na izlazu sklopa dobije se napon od $U_{izl} = 100 \text{ V}$ a izlazna struja je $I_{izl} = 50 \text{ mA}$. Izračunaj ulaznu i izlaznu impedansu sklopa i definiši način rada sklopa.

Rješenje: Ulazna impedansa sklopa računa se kao odnos ulaznog napona i ulazne struje:

$$Z_{ul} = \frac{U_{ul}}{I_{ul}} = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \frac{10 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 5 \cdot 10^3 \Omega = 5 \text{ k}\Omega.$$

Izlazna impedansa sklopa računa se kao odnos izlaznog napona i izlazne struje:

$$Z_{izl} = \frac{U_{izl}}{I_{izl}} = \frac{100 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \frac{100 \text{ V}}{50 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 2 \cdot 10^3 \Omega = 2 \text{ k}\Omega.$$

Imajući u vidu da je izlazni napon veći od ulaznog, sklop je pojačavač napona. Impedanse su omske otpornosti, jer je struja u kolu jednosmjerna, kao i napon, pa ulazne i izlazne impedanse ne zavise od frekvencije.

- 10.* Ulazni napon filtra je $U_{ul} = 4 + j3 \text{ [V]}$ a ulazna struja $I_{ul} = 3 + j4 \text{ [A]}$. Na izlazu sklopa dobije se napon od $U_{izl} = 10 + j6 \text{ [V]}$ a izlazna struja je $I_{izl} = 5 + j8 \text{ [A]}$. Izračunaj ulaznu i izlaznu kompleksnu impedansu sklopa i definiši način rada sklopa.

Rješenje: Ulazna impedansa filtra računa se kao odnos ulaznog napona i ulazne struje:

$$Z_{ul} = \frac{U_{ul}}{I_{ul}} = \frac{4 + j3}{3 + j4} = \frac{4 + j3}{3 + j4} \cdot \frac{3 - j4}{3 - j4} = \frac{(4 + j3) \cdot (3 - j4)}{3^2 + 4^2} = \frac{24}{25} - j \frac{7}{25} (\Omega).$$

Izlazna impedansa filtra računa se kao odnos izlaznog napona i izlazne struje:

$$Z_{izl} = \frac{U_{izl}}{I_{izl}} = \frac{10 + j6}{5 + j8} = \frac{10 + j6}{5 + j8} \cdot \frac{5 - j8}{5 - j8} = \frac{(10 + j6) \cdot (5 - j8)}{5^2 + 8^2} = \frac{98}{89} - j \frac{50}{89} (\Omega).$$

Ulazna i izlazna impedansa predstavljaju kapacitivna opterećenja (zbog predznaka „-“ ispred imaginarnog dijela impedanse). Ako je ulazna impedansa velika za signale malih frekvencija, onda će filter slabiti manje frekvencije. Ako je ulazna impedansa mala za signale velikih frekvencija, onda će filter propuštati signale visokih frekvencija. Važi i obrnuto razmatranje. Izlazna impedansa važna je zbog sprege izlaza

filtarske ćelije na ulaz druge filtarske ćelije, pošto je u slučaju kada je izlazna impedansa prve ćelije jednaka ulaznoj impedansi druge ćelije, obezbijeđen maksimalan prenos snage između ćelija.

- 11.*** NF LC filter prikazan na slici 3.28 ima graničnu učestanost 4 kHz i vrijednost otpornika $R = 600 \Omega$. Odredi:

- a) vrijednosti L i C
- b) slabljenje filtra na učestanosti $f = 5$ kHz.

Rješenje:

- a) Na slici 3.28. prikazan je NF LC filtarske ćelije. Induktivnost kalema i kapacitivnost kondenzatora računa se po formuli:

$$L = \frac{R}{\pi f_c} = \frac{600 \Omega}{3,14 \cdot 4000 \text{ Hz}} = 47,7 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{\pi f_c R} = \frac{1}{3,14 \cdot 4000 \text{ Hz} \cdot 600 \Omega} = 100 \text{ nF}$$

- b) Slabljenje filtra računa se po formuli:

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1} \right)^2 = \left(\frac{5000 \text{ Hz}}{4000 \text{ Hz}} + \sqrt{\left(\frac{5000 \text{ Hz}}{4000 \text{ Hz}} \right)^2 - 1} \right)^2 = 4$$

- 12.*** VF filter prikazan na slici 3.32 ima graničnu učestanost $f_c = 2154$ Hz i vrijednost otpornika $R = 600 \Omega$. Odredi vrijednosti L i C.

Rješenje: Na slici 3.32. prikazan je VF LC filter. Vrijednosti za induktivnost kalema i kapacitivnost kondenzatora računaju se po formuli:

$$\begin{aligned} L &= \frac{R}{4\pi f_c} \\ &= \frac{600 \Omega}{4 \cdot 3,14 \cdot 2154 \text{ Hz}} \\ &= 22,2 \text{ mH.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{4\pi f_c R} \\ &= \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 2154 \text{ Hz} \cdot 600 \Omega} \\ &= 6,16 \cdot 10^{-8} \text{ F} = 61,6 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 61,6 \text{ nF.} \end{aligned}$$

- 13.*** Filter propusnik opsega učestanosti prikazan na slici 3.36 ima granične učestanost $f_{c1} = 1$ kHz i $f_{c2} = 5$ kHz. Ulazna otpornost kola na koje se filter priključuje jeste 600Ω . Odredi:

- a) vrijednosti kapacitivnosti i kondenzatora koji sačinjavaju filter
- b) rezonantnu frekvenciju filtra.

Rješenje:

a) Na slici 3.36. prikazan je LC filter propusnik opsega učestanosti. Kapacitivnost kondenzatora C_1 i C_2 koji sačinjavaju filter računa se po formuli:

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{f_{C_2} - f_{C_1}}{4\pi R f_{C_2} f_{C_1}} \\&= \frac{5 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz}}{4 \cdot 3,14 \cdot 5000 \text{ Hz} \cdot 1000 \cdot 600 \Omega} \\&= \frac{4 \text{ kHz}}{3,768 \cdot 10^{10}} \\&= 1061,57 \cdot 10^{-10} \text{ F} \\&= 106,157 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 106,157 \text{ nF}.\end{aligned}$$

Da bismo izračunali kapacitivnost drugog kondenzatora, moramo izračunati i induktivnost prvog kalema L_1 . Njegova vrijednost računa se po formuli:

$$\begin{aligned}L_1 &= \frac{R}{\pi(f_{C_2} - f_{C_1})} \\&= \frac{600 \Omega}{3,14 \cdot (5 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz})} \\&= \frac{600 \Omega}{12560 \text{ Hz}} \\&= 47,7 \text{ mH}.\end{aligned}$$

Vrijednost druge kapacitivnosti kondenzatora računa se po formuli:

$$\begin{aligned}C_2 &= \frac{L_1}{R^2} \\&= \frac{47,7 \cdot 10^{-3}}{600^2} \\&= 132,5 \cdot 10^{-9} \text{ F} \\&= 132,5 \text{ nF}.\end{aligned}$$

b) Rezonantna frekvencija filtra je:

$$f_0 = \sqrt{f_{C_1} \cdot f_{C_2}} = \sqrt{1 \text{ kHz} \cdot 5 \text{ kHz}} = \sqrt{5 (\text{kHz})^2} = 2,24 \text{ kHz}$$



4. Prenos signala

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš principe i vrste prenosa
- objasniš pojam i osnovne vrste multipleksnog prenosa signala: vremenski, frekvencijski i kodni
- nacrtáš blok-šemu i skiciraš raspored kanala za zadata vrstu multipleksnog prenosa
- na zatom primjeru razlikuješ karakteristike signala za osnovne vrste multipleksnog prenosa.



Osnovni zadatak telekomunikacionih sistema jeste prenos signala na daljinu. U ovom poglavlju upoznaćeš se sa različitim vrstama prenosa signala, kao i principima na kojima se ta vrsta prenosa zasniva.

Poseban značaj u prenosu signala predstavlja istovremen prenos više signala istim prenosnim sistemom. Ovaj proces naziva se multipleksiranje. Multipleksiraju se i analogni i digitalni signali. Multipleksiranje ima veliku primjenu ne samo u telekomunikacionim sistemima, već i u računarskim

tehnologijama. Radi rješavanja problema koji se javljaju pri prijemu poruka velike dužine, razvijeni su mehanizmi rastavljanja, prenošenja i ponovnog sastavljanja poruka. Kada je nepogodno ili skupo da se za svaki par procesa koji međusobno komuniciraju uspostavlja zasebna veza, koristi se mogućnost da se ista linija veze upotrijebi za više istovremenih, nezavisnih komunikacija.

U drugom dijelu poglavlja opisane su osnovne vrste multipleksnog prenosa.

4.1. Principi različitih vrsta prenosa signala

4.1.1. Analogni i digitalni sistemi prenosa

Sistemi za prenos signala analogni su ako prenose analogne signale, a digitalni ako prenose digitalne signale. U prirodi su svi procesi analogni (npr. govorni signali), dok su signali koje generiše računar (podaci) digitalni signali. U slučaju, na primjer, telefonskog razgovora, analogni govorni signal prenosi se od predajnika do prijemnika. Signal govora generiše se u mikrofONU, promjenom vazdušnog pritiska koji se mijenja kontinualno, i koji na izlazu mikrofona generiše električnu struju koja se mijenja u ritmu promjene pritiska na ulazu u mikrofON. Na prijemnoj strani analogni signal se obrađuje i pretvara u zvučne talase, pomoću zvučnika. Signali koje generiše računar, predstavljaju digitalne podatke oblika povorke (niza nula i jedinica) koji se prenose i obrađuju pomoću digitalnih uređaja u računarskim mrežama (skup više međusobno povezanih računara i komunikacionih uređaja).

Digitalizacija je trend u savremenim telekomunikacijama, tako da su danas skoro svi telekomunikacioni uređaji i sistemi digitalni. Telefoniranje se uglavnom obavlja pametnim telefonima zasnovanim na digitalnoj tehnologiji, fiksne telefonske linije su digitalizovane, televizijski prenos obavlja se kroz digitalne sisteme, satelitski prenos obavlja se uz pomoć digitalnih uređaja itd. Današnji digitalni sistemi omogućavaju prenos i analognih i digitalnih signala, pri čemu se analogni signali u predajnom dijelu sistema pretvaraju (konvertuju) u digitalne. U prijemnicima se vrši obrnut postupak: digitalni signali transformišu se u analogne signale. Zbog prednosti digitalnih uređaja i sistema za digitalni prenos podataka, analogni sistemi i uređaji za analogni prenos podataka danas su sve manje u upotrebi.

DODATAK +

Savremene komunikacione tehnologije razvijale su se u skladu sa pronalascima i razvojem tranzistora, mikroprocesora, računara, kao i optičkih medijuma za smještanje i prenos informacija. Do sredine prošlog vijeka računarski uređaji su vršili obradu podataka i njihovo pretvaranje u informacije, dok su telekomunikacioni uređaji prenosili informacije na daljinu. Ova dva pravca u tehnologiji do pedesetih godina prošlog vijeka razvijala su se skoro nezavisno, kada otpočinje revolucija u telekomunikacijama koja je dovela do digitalne konvergencije – težnje za sažimanjem računarskih i komunikacionih tehnologija u jedinstvenu informaciono-komunikacionu tehnologiju (ICT – *Information and Communication Technology*). ICT ima tri trenda razvoja: (1) globalizacija, (2) personalizacija, (3) digitalizacija.

Globalizacija je proces kojim se u današnjem svijetu postepeno ukidaju ograničenja protoka roba, usluga, ljudi i ideja među različitim državama i djelovima svijeta. Taj proces karakteriše i razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija, koje su sve više prisutne u svakodnevnom životu u svim djelovima svijeta. Ubrzan razvoj i napredak informaciono-komunikacionih tehnologija dovodi do novog načina života i rada, stvaranja novih vrijednosti, mijenjanja navika i ponašanja. Informacije se skoro trenutno prenose s jednog kraja svijeta na drugi, internet u cijelom svijetu postaje jedan od osnovnih pokretača razvoja društva i sredstvo povezivanja svijeta u jedinstvenu cjelinu.

Personalizacija ICT podrazumijeva mogućnost prilagođavanja karakteristika ICT usluga željama i potrebama pojedinačnih korisnika. Korisnik dobija mogućnost da sam podešava parametre usluga, prilagođavajući ih sebi i svojim potrebama. Zadovoljstvo korisnika pruženim uslugama jedan je od najvažnijih činilaca pri donošenju odluke o izboru davaoca određenih ICT usluga. Što je korisnik zadovoljniji uslugama koje mu davalac pruža, tim više će koristiti odgovarajuće servise, donoseći pri tome i veći profit davaocu za kojeg se opredijelio.

Digitalizacija komunikacionih sistema počela je 60-ih godina prošlog vijeka razvojem mikroprocesorskih čipova i prvih računarskih mreža. Intenzivan razvoj digitalnih sistema je počeo 80-ih godina prošlog vijeka razvojem personalnih računara. Danas su skoro svi telekomunikacioni servisi digitalizovani.

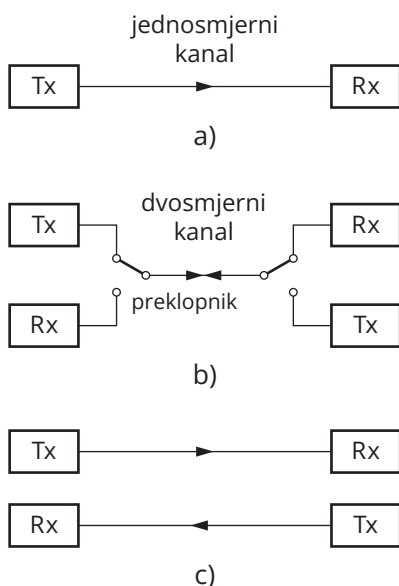
4.1.1.1. Simpleks, poludupleks i puni dupleks prenos podataka

Jedan od najvažnijih segmenata u komunikacionom sistemu jeste prenosni put između predajnika i prijemnika. U literaturi se put prenosa između dvije tačke često označava kao link. Link možemo zamisliti kao liniju koja spaja dvije tačke, odnosno dva uređaja.

Signal se linkom između dva krajnja uređaja može prenositi na različite načine. To najčešće zavisi od smjera komunikacije, od broja puteva prenosa podataka, načina usklađivanja rada uređaja i broja prijemnih stanica.

NAPOMENA

Unutar mreže za prenos, dva kraja linka nazivaju se i čvorovima.



Slika 4.1. Režimi komunikacije:
a) simpleks, b) poludupleks,
c) puni dupleks

PRIMJER IZ PRAKSE

Policijski sistem radio-veze, kao i sistem radio-veze taksi službi, primjeri su poludupleksnog rada.



Komunikacija između dva uređaja može biti ili u jednosmjernom ili dvosmjernom režimu rada. Režimi komunikacije između predajnika (označenog sa T_x – engl. *transmitter*) i prijemnika (označenog sa R_x – engl. *receiver*) prikazani su na slici 4.1. Komunikacioni sistemi funkcionišu ili u jednosmjernom ili dvosmjernom režimu rada. Komunikacija u jednom smjeru naziva se **simpleksni način rada – simpleks prenos**. Primjer jednosmjerne komunikacije jesu difuzni sistemi, u kojima se podaci prenose od jednog predajnika ka većem broju prijemnika. Primjer difuznih sistema jesu komercijalne radio i TV stanice. Kod ovakvih sistema ne postoji potreba za povratnim kanalom, već se informacija prenosi isključivo od predajnika ka prijemniku. Nedostatak ovih sistema jeste potpuno odsustvo komunikacije između prijemnika i predajnika, pošto prijemnik ne raspolaže vezom kojom bi mogao da obavijesti predajnik o eventualnim problemima u prenosu informacija. Režim komunikacije simpleks prenosa prikazan je na slici 4.1a.

Veliki broj sistema veze zahtijeva kanal koji omogućava komunikaciju u oba smjera. Takav slučaj je telefonska komunikacija, komunikacija radio-vezom ili internet-komunikacija. Postoje dvije mogućnosti za dvosmjernu komunikaciju: **poludupleksni režim rada** i **režim rada u punom dupleksu**.

Režim rada u **poludupleksu** (engl. *half-duplex* ili *semi-duplex*), prikazan na slici 4.1b, podržava dvosmjernu komunikaciju, ali samo u jednom smjeru u jednom trenutku. Jednostavnije rečeno, kada jedan učesnik u komunikaciji govori, drugi ga može samo slušati (i obrnuto). Ovo je tipično za profesionalne radio-sisteme koji, zbog jednostavnosti i niže cijene, koriste zajednički kanal za oba smjera prenosa. Ako korisnički terminal emituje, on u tom trenutku ne može primati signal od drugog terminala. Smjer komunikacije podešava se odgovarajućim preklopnikom na primopredajnom terminalu, kojim se uključuje predajnik i istovremeno isključuje prijemnik, i obrnuto.

Režim rada u **punom dupleksu** (engl. *full-duplex*), prikazan na slici 4.1c, može da podrži istovremeno dvosmjernu komunikaciju pomoću dva odvojena kanala, po jedan za svaki smjer prenosa. Ovo je skuplje rješenje u odnosu na poludupleksni rad, ali je komunikacija prirodija – korisnici međusobno neposredno komuniciraju. Puni dupleks tipičan je za telefonske sisteme i računarske mreže.

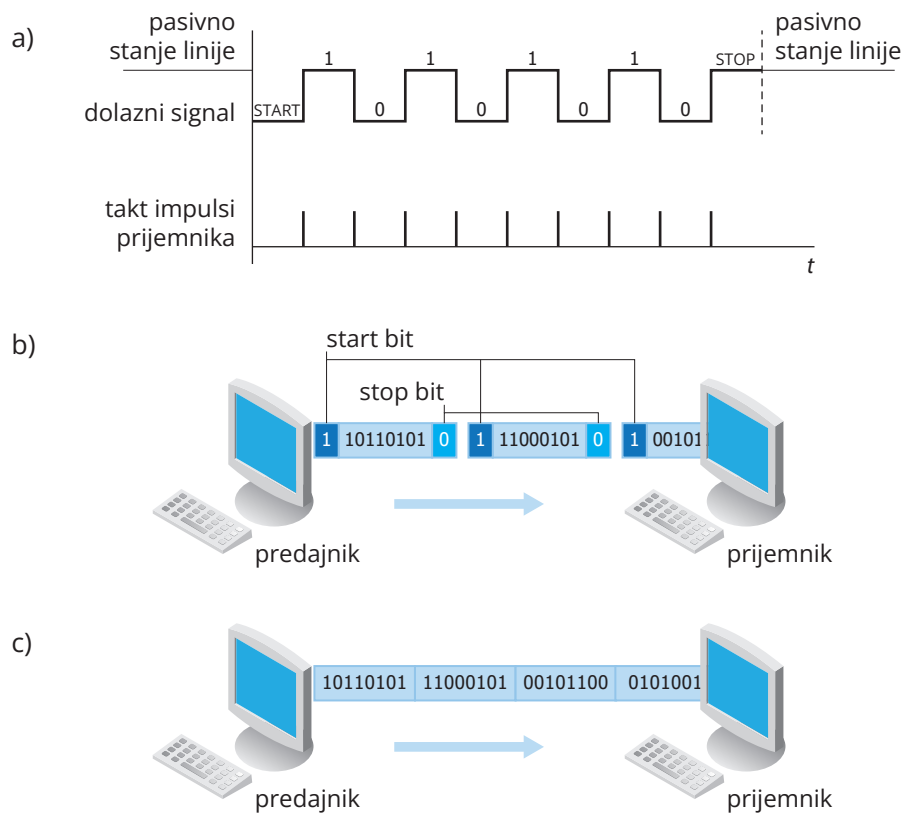
4.1.1.2. Serijski i paralelni prenos podataka

Kada je o prenosu podataka riječ, digitalni podaci se kroz medijum prenosa (žicu, optičko vlakno itd.) prenose serijski ili paralelno – slika 4.2. Kod serijskog prenosa bitovi se prenose preko jednog provodnika, jedan po jedan. Preciznije, pri serijskom prenosu potrebna su najmanje dva provodnika – jedan za podatke, a drugi za zatvaranje strujnog kola između dva uređaja koji serijski komuniciraju.

Kada se podaci ne predaju, linija se nalazi u pasivnom stanju. Prije slanja podataka, predajnik emituje start-bit, čije je trajanje jednako dužini jednog bitskog intervala i koji je suprotnog polariteta u odnosu na pasivno stanje. Nakon toga slijede bitovi podataka. Niz bitova podataka završava se stop-bitom koji je istog polariteta kao i pasivno stanje. Stop-bit služi da se jasno definiše zadnji bit prenetog znaka.

Na drugoj strani veze, kada detektuje prednju ivicu start-bita, prijemnik aktivira generisanje svojih prijemnih taktnih impulsa. Na taj način pravilno će primati povorku poslanih bitova, bez potrebe da mu predajnik šalje svoje taktne impulse. Na slici 4.3a prikazani su vremenski oblici start-stop bita i takt impulsa.

Primjer emitovanih podataka korišćenjem start-stop sistema prikazan je na slici 4.3b.



Slika 4.3. Asinhroni i sinhroni prenos podataka

Efikasniji način za usklađivanje komunikacije između predajnika i prijemnika jeste sinhroni prenos. Podaci koji se sinhrono emituju, dolaze do prijemnika kao niz bitova, definisanih u tačno definisanim intervalima vremena. Ti intervali nazivaju se bitski. Da bi predajnik i prijemnik radili sinhrono, odnosno da bi bili vremenski usklađeni, predajnik u svojoj poruci mora emitovati i informaciju o sinhronizaciji. U praksi se to vrši tako što se podaci

emituju kao okviri fiksne dužine, pri čemu svaki okvir počinje i završava se nizom bitova koji se nazivaju **preamble**. Svrha preamble jeste da ostvari sinhronizaciju elektronskih kola u predajniku i prijemniku, čiji je zadatak generisanje taktnih impulsa, i to prije slanja bitova podataka. Emitovanje bitova preamble omogućuje prijemniku da „uhvati korak“ sa predajnikom, i tako pravilno tumači, odnosno interpretira emitovane bitove podataka.

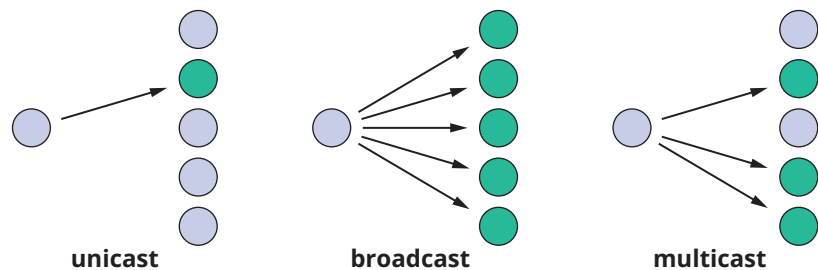
Sinhronizacija predajnika i prijemnika prije slanja bitova podataka pri sinhronom prenosu, prikazana je na slici 4.3c.

4.1.1.4. Unicast, broadcast i multicast prenos

Jedan od načina komunikacije jeste da se poruke koje šalje predajnik prenose samo do jedne prijemne stanice. Riječ je o **unicast** prenosu. Ovakav tip komunikacije je, na primjer, slanje mejla jednom licu, telefoniranje i slično. Drugi način prenosa jeste **broadcast**, ili difuzni prenos, kada jedna predajna stanica šalje poruke prema svim prijemnim stanicama. Jedan od tipičnih primjera broadcast prenosa jeste distribucija radio i televizijskog signala. Bilo koji radio ili TV prijemnik može da primi signal koji emituje jedna stanica.

Posebna vrsta broadcast prenosa jeste **multicast** prenos kod kojeg jedna stanica ne šalje signal svim, već samo grupi prijemnika. U slučaju multicast prenosa, stanice su grupisane u multicast grupe, tako da se isti sadržaj isporučuje svim korisnicima koji su u istoj grupi. Primjer multicast prenosa jesu televizija preko interneta (*IPTV – internet protocol television*) i video-konferencije (Zoom, Meet, Teams i sl.).

Na slici 4.4 ilustrovan je koncept navedenih tipova prenosa poruka.



Slika 4.4. Unicast, broadcast i multicast prenos

4.1.1.5. Prenos u osnovnom opsegu i prenos sa modulisanim nosiocem

Vidjeli smo da je osnovni preduslov prenošenja informacije posredstvom nekog komunikacionog sistema njeno prethodno pretvaranje u električni signal. Tako, na primjer, mikrofonski pretvarač pretvara pritisak zvučnog talasa u električni napon, video-kamere pretvaraju svjetlost u analogne ili digitalne

električne signale, dok se informacije koje unosimo u računar posredstvom miša ili tastature, pretvaraju u binarne električne signale. Sve su to signali u **osnovnom opsegu** (engl. *baseband*). Najjednostavniji oblik prenosa električnih signala jeste da se oni prenose u svom izvornom obliku, i to se naziva prenos u osnovnom opsegu učestanosti. U nekim komunikacionim sistemima informacioni signali prenose se u svom osnovnom opsegu preko prenosnog medijuma. Primjer za ovakav prenos jesu računarske mreže, čije se komponente međusobno povezuju kablovima.

U mnogim komunikacionim sistemima prenos signala u svom osnovnom opsegu je nepraktičan, pa se signal (umjesto u osnovnom) prenosi u nekom drugom, višem opsegu učestanosti. Taj novi opseg naziva se **transponovani opseg**. Postoji više razloga za ovakav način prenosa. U slučaju prenosa signala radio-putem, dimenzije antena moraju biti reda veličine talasne dužine signala koji se prenosi, tj. dužine antena obrnuto su srazmjerne frekvencijama signala koji se prenose. Na primjer, za prenos signala govora u osnovnom opsegu od 4 kHz, kome odgovara talasna dužina od 75 km, bile bi nam potrebne antene dužine desetak kilometra, što je u praksi nemoguće ostvariti. Dovoljno male dužine antena mogu se ostvariti samo pri prenosu signala visokih učestanosti. Dakle, ako se želi njegov prenos radio-putem, signal iz osnovnog opsega treba pomjeriti u viši.

Pri prenosu signala osnovni je cilj da se isti medijum prenosa iskoristi za prenos više signala koje emituju nezavisni izvori. Ovakav princip istovremenog prenosa više signala po zajedničkom medijumu naziva se **multipleksiranje**. Ako se signal prenosi radio-putem, bez multipleksiranja, na jednoj teritoriji mogao bi se prenositi samo jedan signal. Transponovanjem frekvencija signala omogućuje se multipleksiranje i korišćenje raspoloživog radio-spektra.

Transponovanje se koristi da bi se što uspješnije iskoristile mogućnosti prenosnih sistema. Opseg učestanosti u kojem prenosni sistem (radio, kablovi) ima dobre karakteristike sa stanovišta prenosa signala, izobličenja, smetnji, interferencija i slično, ne mora da se poklopi sa opsegom učestanosti u kojem se nalazi preneseni signal. Zbog toga se signal transponuje iz svog osnovnog opsega u drugi **VF (visokofrekvencijski)** opseg, pogodniji za prenos, tj. vrši se modulacija signala.

NAPOMENA

Sa tehnikama modulacije detaljno ćeš se upoznati u drugom razredu, iz modula Elektronske komunikacije II.

Modulacija je postupak obrade signala da bi se signal učinio pogodnijim za prenos. U ovom postupku koristi se pomoćni signal visoke frekvencije (signal nosilac) u koji se utiskuje signal koji se želi prenijeti (korisni signal). Znači, u postupku modulacije koriste se dva signala: korisni signal koji se obrađuje – moduliše, i pomoćni signal – signal nosilac, kojim se korisni signal transponuje u viši opseg učestanosti, i u tom obliku prenosi prenosnim sistemom.

4.2. Principi multipleksnog prenosa

Davaoci telekomunikacionih usluga imaju visoka ulaganja i značajne troškove kada razvijaju i izgrađuju prenosne sisteme. Ovo je jedan od razloga zašto su svi prenosni sistemi zasnovani na osnovnom principu da se koriste za prenos više nezavisnih informacija, od više različitih korisnika. Ovaj princip naziva se **multipleksiranje**.

Multipleksiranje omogućava prenos više nezavisnih signala preko jedne komunikacione linije, odnosno jednog prenosnog sistema.

Signali, nosioci informacije, razdvajaju se postupcima multipleksiranja na nezavisne kanale. Uređaji za prosljeđivanje više različitih signala na zajedničku komunikacionu liniju nazivaju se **multiplekseri**. Uređaji koji vrše obrnutu operaciju, to jest raspodjelu svih signala sa zajedničke linije na prijemne kanale, zovu se **demultiplekseri**. Multiplekseri se nalaze na predajnoj strani, a demultiplekseri na prijemnoj strani telekomunikacionog sistema.

Multipleksiranje omogućava raspodjelu jedne komunikacione linije na više različitih nezavisnih signala, i obrnuto. Ranije smo napomenuli da se svaki signal može ravnopravno predstaviti u vremenskom i frekvencijskom obliku – pomoću njegovog spektra. Imajući to u vidu, raspodjela kanala može se vršiti po vremenu i po frekvenciji.

Principi multipleksiranja mogu se podijeliti u tri glavne grupe: **multipleksiranje** sa frekvencijskom raspodjelom kanala – FDM (*Frequency Division Multiplexing*), **multipleksiranje** sa vremenskom raspodjelom kanala – TDM (*Time Division Multiplexing*) i **kodno multipleksiranje** – CDM (*Code Division Multiplexing*).

U sistemu sa frekvencijskom raspodjelom kanala, razdvajanje kanala vrši se tako što se svakom kanalu dodijeli različita frekvencija, koju taj kanal isključivo koristi, što omogućava istovremen prenos više nezavisnih signala. U ovom slučaju, na zajedničkoj komunikacionoj liniji u svakom trenutku prisutni su svi nezavisni signali.

Kodni multipleks koristi tehniku razdvajanja kanala tako što ih kodira na različite načine. Na taj način signali se razdvajaju radi bezbjednosti prenosa.

DODATAK +

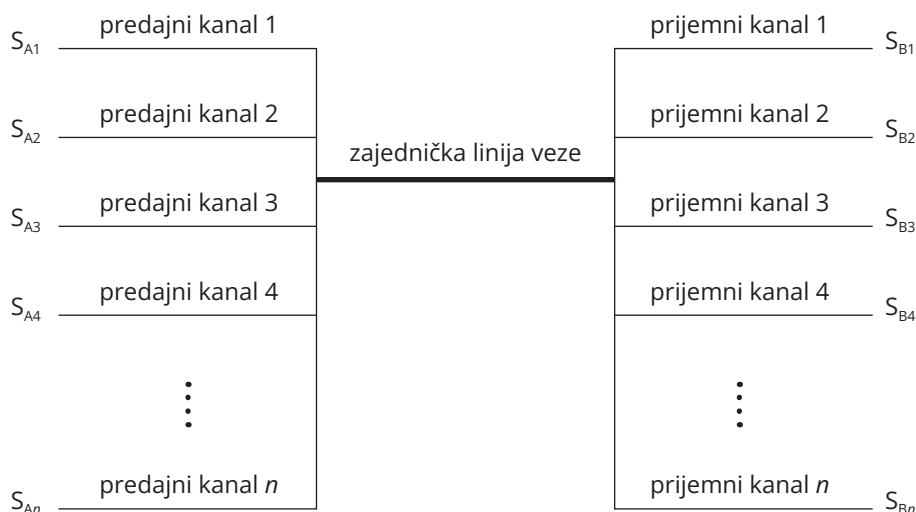
U sistemu sa vremenskom raspodjelom kanala, svakom kanalu se za prenos informacija dodjeljuje kratak vremenski interval. U ovom slučaju, na zajedničkoj komunikacionoj liniji u svakom trenutku prisutni su dijelovi nezavisnih signala.

Pored tri glavne grupe multipleksiranja postoje i talasno multipleksiranje – WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) i prostorno multipleksiranje – SpDM (*Space Division Multiplexing*). Talasno multipleksiranje se koristi kod multipleksiranja signala različitih talasnih dužina, koji se prenose optičkim vlaknima, gdje jedno optičko vlakno može da nosi i preko 100 talasnih dužina. Prostorno multipleksiranje se koristi kod tehnike bežičnog prenosa, kojim se omogućava prenos nezavisnih kodiranih signala od više predajnih antena.

U daljem tekstu opisaćemo osnovne koncepte na kojima su ove tehnike zasnovane.

Multipleksni sistem omogućava prenos više nezavisnih poruka jednom linijom veze. Zato se sistem sastoji od predajnih i prijemnih kanala, kojima se prenose različiti signali, nezavisno jedan od drugog, preko jedne zajedničke linije veze.

Na slici 4.5 prikazana je opšta šema sistema za n -kanalni multipleksni prenos, gdje su signali s indeksom A označeni kao predajni, a indeksom B kao prijemni.

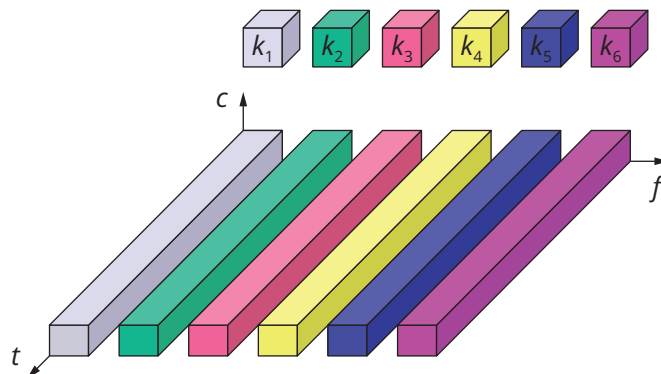


Slika 4.5. Opšta blok-šema sistema za n -kanalni multipleksni prenos

4.2.1. Multipleksiranje sa frekvencijskom raspodjelom kanala (FDM)

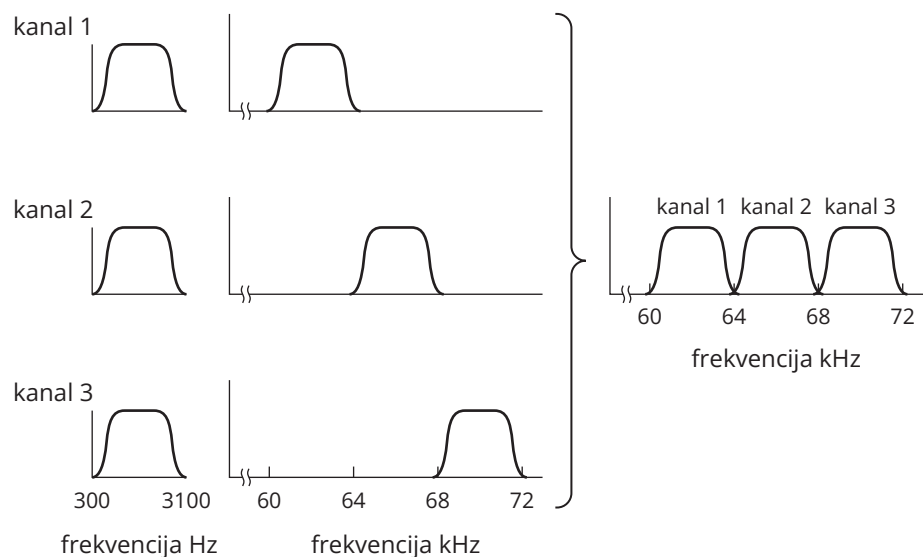
Postupak frekvencijske raspodjele kanala (FDM) uglavnom se primjenjuje na analognim signalima. Najčešće se vrši pri emitovanju radija i nekadašnjih TV programa (radio i TV difuzija). Osnova FDM-a jeste da se raspoloživi opseg učestanosti potreban za prenos signala podijeli na više grupa, odnosno kanala, kojima se informacije prenose nezavisno jedna od druge. Uređaj koji obavlja ovaj postupak prihvata više signala iz različitih izvora. Svakom od njih dodjeljuje odgovarajući opseg, a zatim ih grupiše u odgovarajuću cjelinu (grupu signala) koja zauzima mnogo veći opseg učestanosti, i šalje na zajednički prenosni sistem. Na zajedničkom prenosnom sistemu prisutni su svi signali generisani od više izvora na predajnoj strani sistema.

Na odredištu se vrši obrnut postupak. Iz dobijenog složenog signala, FDM uređaj izdvaja pojedinačne signale i usmjerava ih krajnjim korisnicima. Na slici 4.6 grafički je predstavljen princip frekvencijskog multipleksiranja sa šest različitih kanala, razdvojenih po frekvencijama, što je prikazano frekvencijskoj osi f , čiji se prenos vrši istovremeno, što je prikazano na vremenskoj osi, zajednički prenosnim medijumom. Na slici su sa k_i ($i = 1, 2, 3, 4...$) označeni kanali kojima se prenose odgovarajući signali.



Slika 4.6. Grafička predstava multipleksiranja sa frekvencijskom raspodjelom kanala

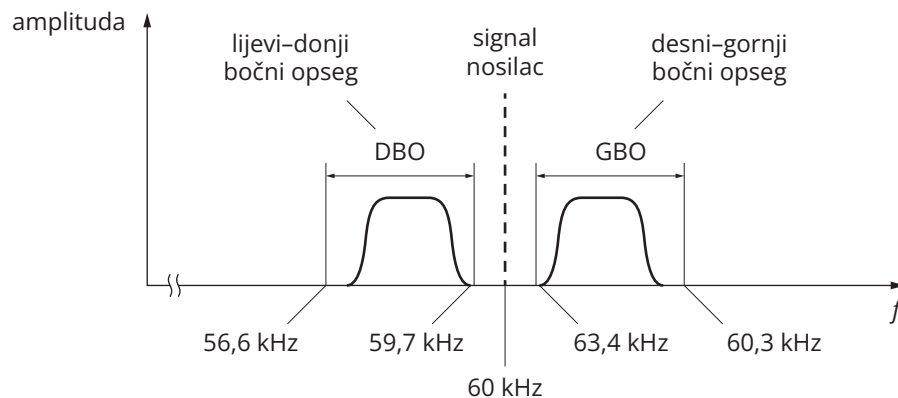
Proces frekvencijskog multipleksiranja može se podijeliti na nekoliko koraka. Prvi korak je podjela raspoloživog opsega učestanosti na manje opsege, podopsege ili kanale. U drugom koraku signal u svakom od kanala se utiskuje u odgovarajući signal nosilac. Svaki signal iz svog kanala ima svoj signal nosilac koji se utiskuje u signal, i koji ga prenosi u VF – transponovanu oblast. U trećem koraku modulirani signali se iz svih kanala grupišu u jedan složeni, analogni signal, čiji frekvencijski opseg obuhvata sve podopsege. U četvrtom koraku vrši se prenos složenog signala zajedničkim prenosnim medijumom. U petom koraku, na mjestu prijema, odgovarajućim filtrima se iz složenog (frekvencijski multipleksiranog) signala izdvajaju njegove komponente. Dobijeni signali se demodulišu, čime se rekonstruišu originalni signali.



Slika 4.7. Princip FDM za tri telefonska kanala

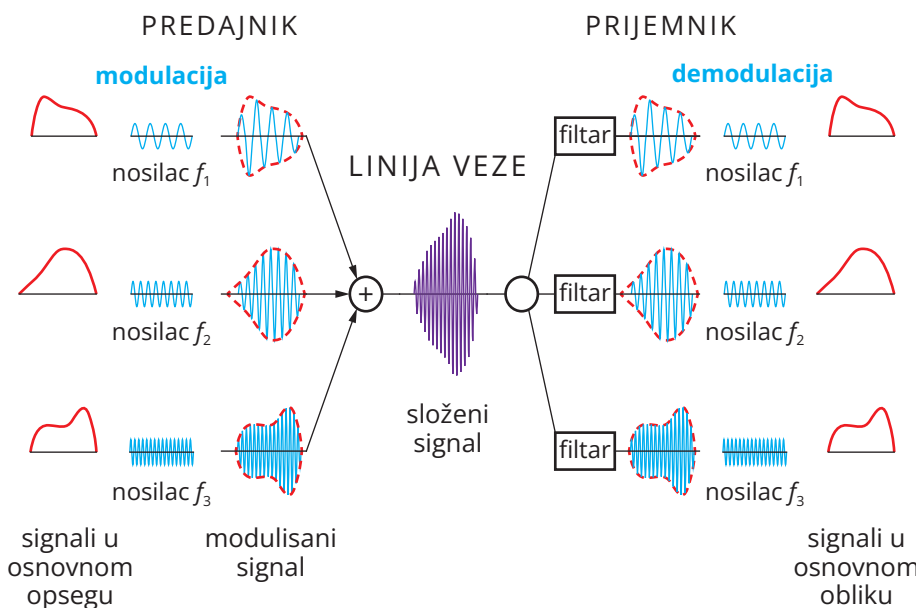
Na slici 4.7 prikazan je postupak frekvencijskog multipleksiranja zajedničkog kanala na tri različita telefonska signala. Telefonski signali iz tri nezavisna izvora se filtrom propusnikom opsega učestanosti ograničavaju na propusni opseg 300–3400 Hz, što predstavlja opseg govornog signala. Poslije filtriranja telefonski signali se, postupkom modulacije, utiskuju u odgovarajuće signale nosioce, koji su različitih frekvencija. Tim postupkom signali se pomjeraju u više frekvencijsko područje, koje odgovara učestanostima njihovih nosilaca. Pri tome se oko nosilaca formiraju takozvani bočni opsezi – desni (gornji) ili lijevi (donji) bočni opsezi, u ovom slučaju od 60 kHz do 64 kHz, 64 kHz do 68 kHz i od 68 kHz do 72 kHz, ako se prenos vrši u desnom bočnom opsegu. Širina modulisanog signala u tom opsegu dobija se tako što se frekvenciji signala nosioca dodaju granične frekvencije signala koji se moduliše (govorni signal). Signali nosioci po kanalima u ovom slučaju su (redom): 60 kHz, 64 kHz i 68 kHz. Pošto svaki telefonski signal ima sopstveni opseg učestanosti, to se po istomvodu istovremeno mogu prenijeti sva tri telefonska signala a da ne dođe do njihovog međusobnog preklapanja. Kako bi se osiguralo da nema međusobnog miješanja između susjednih opsega učestanosti, oni se razdvajaju zaštitnim opsegom, odnosno **zaštitnom marginom**, koja obično iznosi oko 10% opsega jednog kanala.

Na slici 4.8 prikazana su dva bočna opsega, gornji (desni – GBO) i donji (lijevi – DBO), pri modulaciji sa signalom nosiocem, čija je frekvencija $f = 60$ kHz. U praksi se vrši prenos u lijevom ili desnom bočnom opsegu, jer se korisni signal nalazi u oba bočna opsega.



Slika 4.8. Prikaz oba bočna opsega u kanalu 1

Na prijemnom dijelu vrši se obrnut postupak. Podesnim filtrima se sa zajedničkog prenosnog medijuma, odnosno zajedničke linije veze, iz složenog signala izdvajaju pojedinačni signali. Oni se zatim, u postupku demodulacije, vrate u osnovni opseg. Na slici 4.9 prikazan je postupak frekvencijskog multipleksiranja i demultipleksiranja tri signala, gdje su signali, i na predaji i na prijemu, prikazani u vremenskom domenu.



Slika 4.9. Postupak frekvencijskog multipleksiranja i demultipleksiranja tri signala

Danas se postupak frekvencijskog multipleksa najviše koristi u difuziji radio i televizijskih programa. Naime, državne regulatorne agencije dodjeljuju emiterima radio i TV programa odgovarajuće frekvencijske opsege za emitovanje programa u svojim zemljama. Zajednički medijum prenosa jeste slobodni prostor. Slušaoci i gledaoci, izborom kanala na svojim radio i TV prijemnicima, prate izabrani program.

NAPOMENA

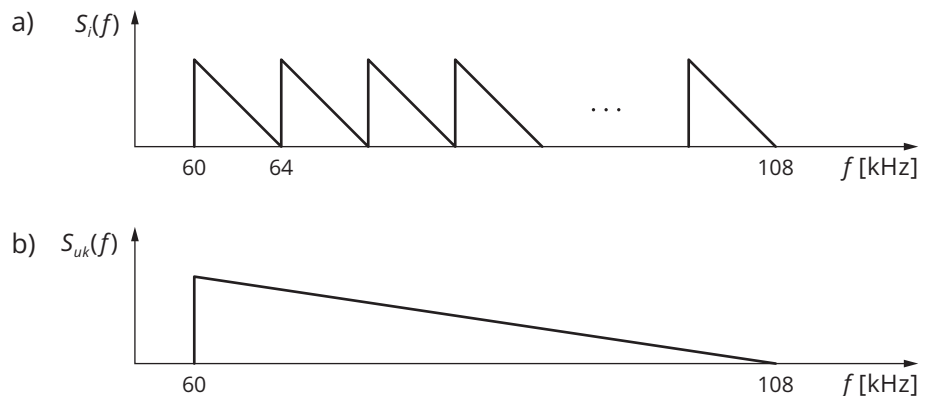
U optičkim telekomunikacijama multipleksiranje se vrši po talasnim dužinama – WDM (*Wavelength Division Multiplex*). Ubacivanjem svjetlosnih signala različitih talasnih dužina u optičko vlakno, onemogućuje se njihovo miješanje duž vlakna. To praktično znači da se jednim optičkim vodom može prenijeti istovremeno više signala različitih talasnih dužinama. Na ovaj način povećava se kapacitet optičkog kabela.

4.2.1.1. Direktna i višestruka (predgrupna) modulacija

U ranijim telefonskim sistemima za prenos govora koristila se frekvencijska raspodjela kanala. Razmotrićemo, zbog teorijskog značaja, kako se ovaj proces odvijao.

Postoje dva načina frekvencijskog multipleksiranja: direktna i višestruka (predgrupna) modulacija. Kod direktne modulacije frekvencijski multipleksni sistem sastoji se od 12 standardnih kanala. U svakom kanalu posebno se moduliše korisni signal – govorni, nakon čega se u posebnim pojasnopropusnim filtrima izdvaja jedan od prenosnih opsega signala (donji bočni opseg). Opseg modulisanog signala u donjem bočnom opsegu dobija se tako što se od učestanosti signala nosioca oduzmu granične učestanosti govornog signala. Svaki signal u kanalu ima svoj signal nosilac, čije su učestanosti (redom): $f_1 = 64$ kHz, $f_2 = 68$ kHz, $f_3 = 72$ kHz, $f_4 = 76$ kHz, $f_5 = 80$ kHz, $f_6 = 84$ kHz, $f_7 = 88$ kHz, $f_8 = 92$ kHz, $f_9 = 96$ kHz, $f_{10} = 100$ kHz, $f_{11} = 104$ kHz i $f_{12} = 108$ kHz.

Pošto se radi o govornom signalu, učestanosti signala nosioca su na rastojanju od po 4 kHz zato što je to širina spektra govornog signala. Ovakav multipleksni sistem ima 12 pojasnopropusnih filtara, koji služe za izdvajanje signala u donjem bočnom opsegu i 12 signala nosilaca, po jedan noseći signal za svaki kanal posebno. Na slici 4.10a prikazani su spektri 12 direktno moduliranih govornih signala $S_i(f)$, $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, koji su u opsegu širine 4 kHz, a na slici 4.10b opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal pri direktnoj modulaciji.



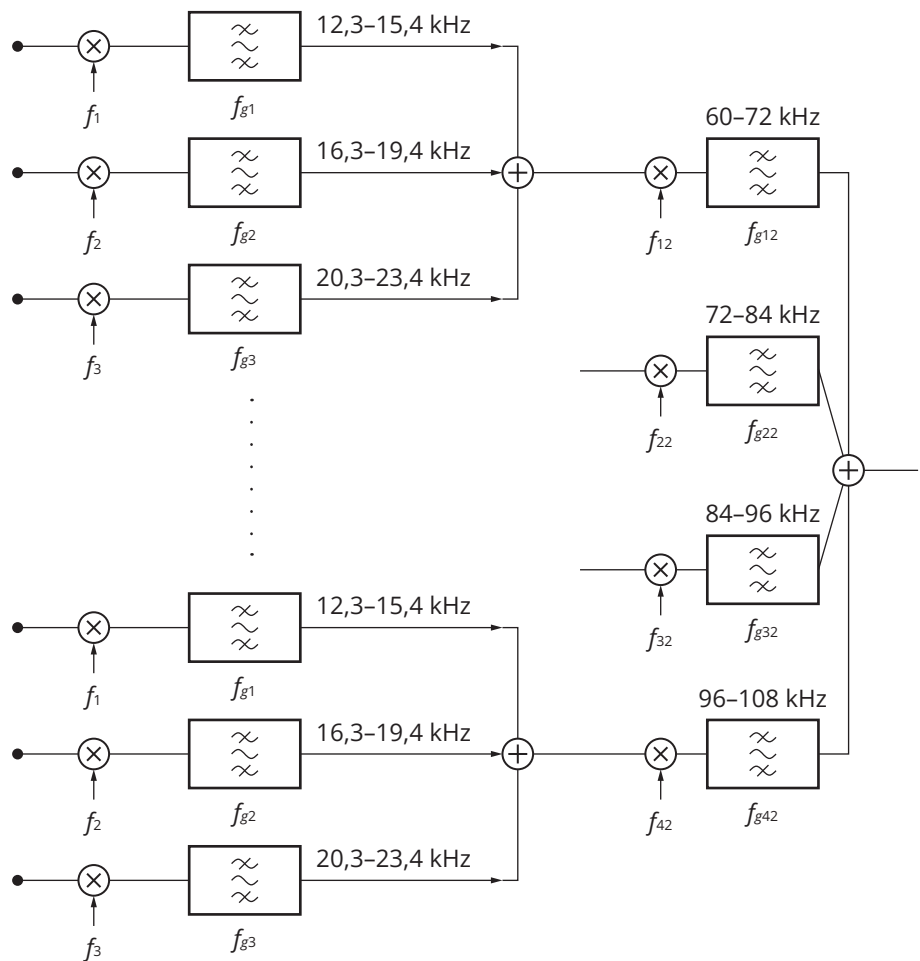
Slika 4.10. Spektar (a) direktno moduliranih signala i (b) opseg zbirnog direktnog moduliranog signala

Broj korisnih signala koji se frekvencijski mogu multipleksirati zavisi od frekvencijskog opsega koji je na raspolaganju. Danas su uobičajeni sistemi sa frekvencijskom raspodjelom kanala kojima se istovremeno može prenijeti od nekoliko stotina do nekoliko hiljada, pa i više različitih poruka, što znači da su u tom slučaju potrebne hiljade modulatora i filtara. Zbog toga se, iz ekonomskih razloga, sistem realizuje na drugačiji način – korišćenjem višestruke modulacije, kojom se smanjuje broj uređaja u sistemu.

Višestrukou modulacijom se postiže bolje razdvajanje (udaljavanje) bočnih opsega, što omogućava upotrebu jeftinijih filtara sa slabijim karakteristikama.

Višestruka modulacija govora vrši se tako što se kanali grupišu u četiri predgrupe. Svaka predgrupa ima tri kanala. Svaki se kanal u predgrupi moduliše nosiocima različitim frekvencija (f_1, f_2 i f_3), pri čemu se istim frekvencijama modulišu i ostali kanali u svakoj od četiri predgrupe (slika 4.11).

Svaka od četiri predgrupe zatim se moduliše novim frekvencijama (f_{12}, f_{22}, f_{32} i f_{42}). Na ovaj način postiže se da sistem za frekvencijsko multipleksiranje sa višestrukou modulacijom ima ukupno sedam modulatora (sedam signala nosilaca) i sedam filtara, za razliku od direktne modulacije, kada je bilo potrebno 12 signala nosilaca i 12 filtara (slika 4.11).



Slika 4.11. Blok-šema višestruke modulacije pri frekvencijskom multipleksiranju od 12 kanala

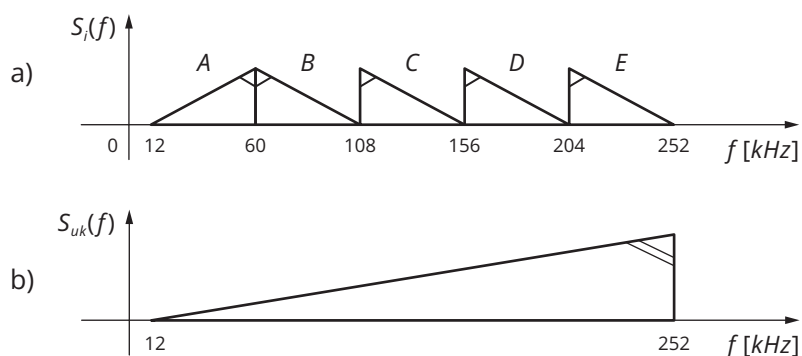
Na slici 4.11 prikazana je blok-šema višestruke modulacije pri frekvencijskom multipleksiranju od 12 kanala. Učestanosti u svakoj grupi su (redom): $f_1 = 12$ kHz, $f_2 = 16$ kHz i $f_3 = 20$ kHz. Modulacija četiri grupe od po tri kanala vrši se sa četiri različita signala nosilaca: $f_{12} = 84$ kHz, $f_{22} = 96$ kHz,

$f_{32} = 108 \text{ kHz}$ i $f_{42} = 120 \text{ kHz}$. Filtri propusnici opsega učestanosti po grupama vrše propuštanje govornog signala u gornjem – višem bočnom opsegu, čije su granične frekvencije (redom): $f_{g1} = 12,3\text{--}15,4 \text{ kHz}$, $f_{g2} = 16,3\text{--}19,4 \text{ kHz}$ i $f_{g3} = 20,3\text{--}23,4 \text{ kHz}$. Govorni signal je u opsegu $0,3\text{--}3,4 \text{ kHz}$. Filtri propusnici opsega učestanosti u drugom stepenu modulacije sa novim signalima nosiocima filtriraju signal u opsezima: $f_{g12} = 60\text{--}72 \text{ kHz}$, $f_{g22} = 72\text{--}84 \text{ kHz}$, $f_{g32} = 84\text{--}96 \text{ kHz}$ i $f_{g42} = 96\text{--}108 \text{ kHz}$. Navedeni opsezi su širine od 12 kHz , što znači da su u svakoj grupi multipleksirana po tri govorna signala. Ukupan opseg multipleksiranog signala je $60\text{--}108 \text{ kHz}$, što je isti opseg kao kod direktne modulacije. Prednost ovog tipa modulacije jeste, kao što smo već utvrdili, manji broj signala nosilaca i manji broj filtara propusnika opsega učestanosti za isti broj predajnih kanala.

U literaturi i tehnici, sistem sa 12 ovako multipleksiranih kanala označava se kao **primarna grupa B**.

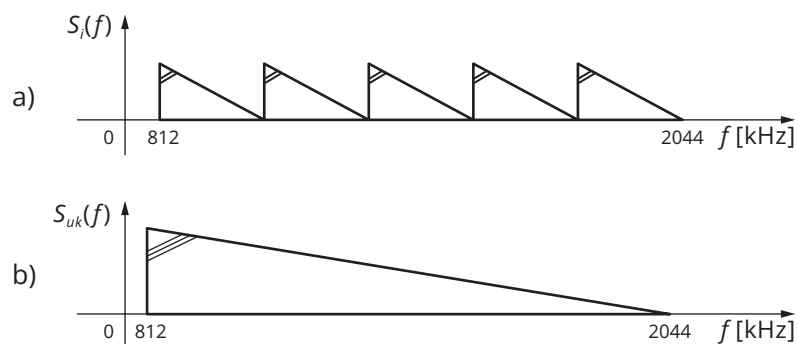
Opisani proces može se nastaviti ako se želi prenijeti još veći broj kanala. Ideja je novo grupisanje. Grupisanjem pet primarnih grupa dobićemo $5 \cdot 12$ kanala = 60 kanala, koji su u opsegu $12\text{--}252 \text{ kHz}$ i koji čine **sekundarnu grupu**. Grupisanjem pet sekundarnih grupa dobiće se **tercijarna grupa** sa $5 \cdot 60 = 300$ kanala u opsegu $812\text{--}2044 \text{ kHz}$. Grupisanjem tri tercijalne grupe dobija se **kvartarna grupa** sa $3 \cdot 300 = 900$ kanala, koji su u opsegu $8156\text{--}12388 \text{ kHz}$.

Na slici 4.12a prikazan je spektar sekundarne grupe od 60 kanala sa pet primarnih grupa od 12 kanala $S_i(f)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$, a na slici 4.12b opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal sekundarne grupe $S_{uk}(f)$.



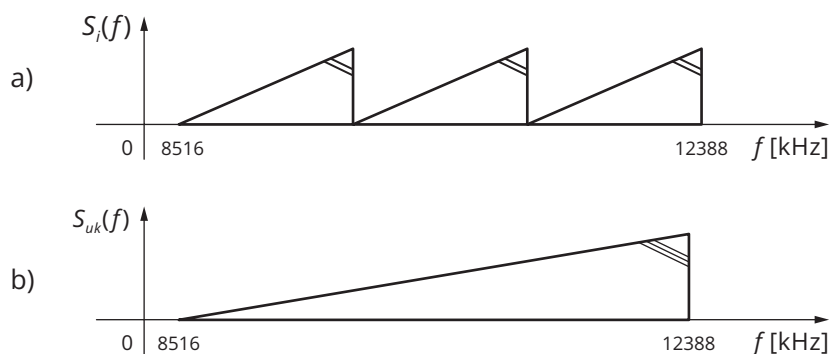
Slika 4.12 Spektar (a) sekundarne grupe od 60 kanala i (b) opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal sekundarne grupe

Na slici 4.13a prikazan je spektar tercijalne grupe od 300 kanala sa pet sekundarnih grupa od 60 kanala $S_i(f)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$, a na slici 4.13b opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal tercijalne grupe $S_{uk}(f)$.



Slika 4.13. Spektar (a) tercijalne grupe od 300 kanala i (b) opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal tercijalne grupe

Na slici 4.14a prikazan je spektar kvartarne grupe od 900 kanala sa tri tercijalne grupe od 300 kanala $S_i(f)$, $i = 1, 2, 3$, a na slici 4.14b opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal kvartarne grupe $S_{uk}(f)$.



Slika 4.14. Spektar (a) kvartarne grupe od 900 kanala i (b) opseg koji zauzima zbirni multipleksni signal kvartarne grupe

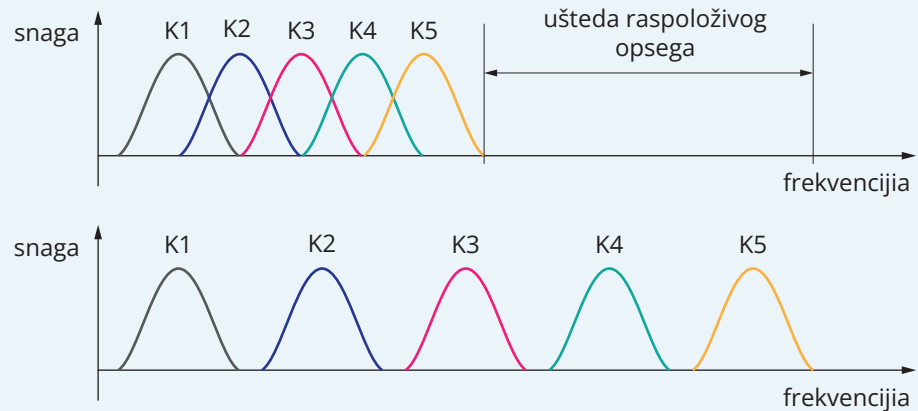
Ortogonalni frekvencijski multipleks

DODATAK +

U prethodnom odjeljku, analizirajući sisteme sa frekvencijskom raspodjelom kanala, naglasili smo da se oni prvenstveno primjenjuju kod analognih signala. Sada ćemo analizirati model zasnovan na frekvencijskoj raspodjeli, ali koji je prvenstveno namijenjen za prenos digitalnih signala. Prije nego što ga opišemo, kratko se osvrnimo na neke nedostatke klasičnog FDM. Opšti pristup svim sistemima multipleksa koji koriste više nosilaca jeste da se, u opsegu koji je na raspolaganju, ubaci što više nosilaca kako bi se prenijelo što više informacija zajedničkim prenosnim medijumom. Pri tome, između kanala na frekvencijskoj osi treba da bude što je moguće manje neiskorišćenog prostora. Kod klasičnog FDM to nije slučaj, između susjednih kanala na frekvencijskoj osi mora se ostaviti razmak (zaštitna margina)

kako se signali ne bi preklapali. Drugi je nedostatak što se za postupak FDM zahtijeva upotreba velikog broja filtara, modulatora i demodulatora.

Radi otklanjanja ovih nedostataka, klasični FDM modifikovan je za potrebe prenosa digitalnih signala. Modifikovani model naziva se sistem sa ortogonalnim frekvencijskim multipleksom (OFDM – *orthogonal frequency division multiplexing*). Na slici ispod ilustrovana je ušteda raspoloživog opsega koja se ostvaruje ovim postupkom.



Praktična realizacija postupka OFDM zasnovana je na modulaciji velikog broja nosilaca signala, koji su relativno blizu jedan drugom na skali frekvencija. Međutim, iako su blizu, među njima ne dolazi do preklapanja. To se postiže tako što se, za razliku od klasičnog FDM, signali OFDM modulišu skupom ortogonalnih nosilaca.

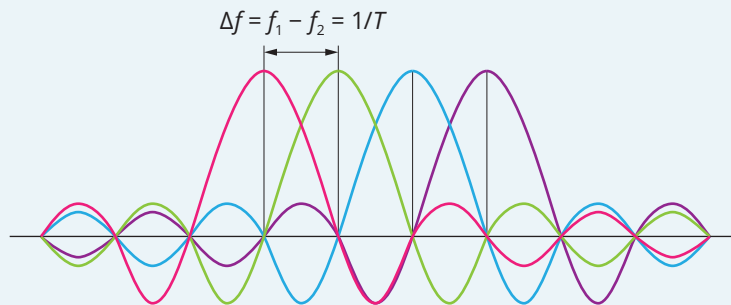
Postavlja se pitanje: šta su ortogonalni signali? Pojam ortogonalnosti izveden je iz vektorske algebre. Dva vektora koji su uzajamno ortogonalni, imaju skalarni proizvod jednak nuli. Na sličan način izvodi se i pojam ortogonalnih funkcija, odnosno signala. Ako se prenose dva ortogonalna signala, u slučaju da se detektuje jedan signal, onda se podrazumijeva da je vrijednost drugog signala jednaka nuli. Ako se ortogonalnost proširi na više signala, tada će, u slučaju da se detektuje jedan od njih, svi ostali biti jednaki nuli.

Na taj način obezbjeđuje se nekoliko važnih stvari. Prvo, pošto se sistem sa ortogonalnim frekvencijskim multipleksom zasniva na modulaciji sa velikim brojem signala nosilaca, dozvoljeno je preklapanje frekvencija među nosiocima, jer će ortogonalnost obezbijediti da ih prijemnik jednostavno razdvoji. Bliska rastojanja nosilaca omogućuju bolju iskorišćenost raspoloživog frekvencijskog spektra. Drugo, za razliku od klasične FDM, nijesu potrebni filtri za razdvajanje nosilaca, što znatno pojednostavljuje prijemnike OFDM signala. Treće, ortogonalnost između nosilaca signala eliminiše moguća preslušavanja. U praksi to znači da pri OFDM prenosu nema interferencije među susjednim signalima.

Za nas je važnije da vidimo koji je uslov ortogonalnosti dva signala vezan za odnos njihovih frekvencija. Primjenom više matematike može se izvesti

da je uslov ortogonalnosti dva signala koji imaju isti period ponavljanja T , da im rastojanje nosilaca bude na udaljenosti $1/T$.

Iz izloženog slijedi osnovna ideja na kojoj se zasniva OFDM, da se tok podataka podijeli u N paralelnih tokova, a svaki od tih manjih protoka da se prenosi preko sopstvenog nosioca. Ovi nosioci su međusobno ortogonalni, tako što je između njih biran odgovarajući frekvencijski razmak $1/T$. Maksimum signala svakog od nosilaca odgovara nulama svih ostalih signala, kao što je prikazano na sljedećoj slici.



Zbog navedenih osobina, OFDM prenos postao je standard za potrebe širokopojasnih digitalnih telekomunikacija, posebno u digitalnoj televiziji, difuznom radio-prenosu, bežičnim mrežama i mobilnoj telefoniji četvrte generacije.

4.2.2. Multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala (TDM)

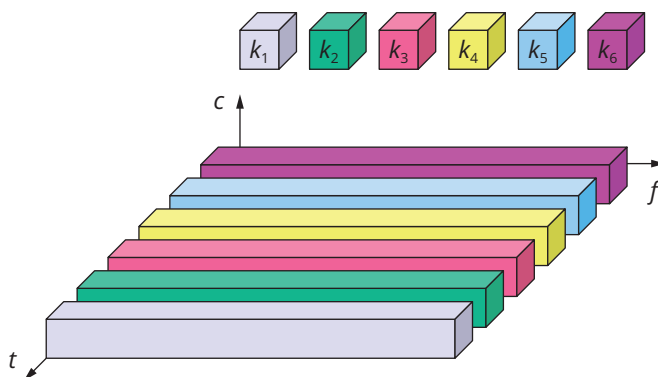
Vremensko multipleksiranje (TDM ili multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala) način je višestrukog korišćenja prenosnog medijuma, u kojem se vrijeme prenosa dijeli na vremenske segmente, vremenske slotove – TS (engl. *time slots*), od kojih svaki sadrži jedan element jednog signala (jedan vremenski segment TS sadrži jedan element jednog signala koji se multipleksira). Drugi vremenski segment TS sadrži jedan element drugog signala, i tako redom do zadnjeg multipleksiranog signala. Vrijeme pristupa zajedničkom kanalu dijeli se na okvire. Svaki okvir se dijeli na vremenske intervale fiksne dužine, koji čine vremenski slot. Znači, u jednom okviru nalazi se po jedan elemenat signala iz više kanala.

Da bi ovo bilo jasnije, poslužimo se sljedećim primjerom. Neka prenosi-mo deset signala, od kojih svaki traje po jedan minut. Kada imamo više signala koje treba prenijeti, vremenski multipleks funkcioniše tako što od svakog signala prenosimo samo njegov dio, recimo od 20 milisekundi. Konkretno, to znači da se 20 milisekundi uzima i prenosi signal broj

jedan kroz prenosni medijum. Potom dolazi red na drugi korisni signal. Multiplekser sada 20 milisekundi uzima i prenosi ovaj drugi korisni signal. Tako stalno „opslužuje“ svaki signal, dok od svih deset signala ne bude preneseno 20 milisekundi. Kada završi tih prvih 20 milisekundi svakog signala, procedura se ponavlja, i opet se od prvog signala prenosi 20 milisekundi, potom 20 milisekundi drugog, i to se ponavlja sve dok potpuno ne prenese sve signale.

Drugim riječima, vremensko multipleksiranje omogućuje prenos signala iz više izvora po zajedničkom prenosnom medijumu tako što se izvorima informacije dodjeljuju određeni trenuci u kojima im je dozvoljeno da emituju signal. Na taj način sprečava se miješanje različitih signala na zajedničkom prenosnom putu.

U zajedničkom prenosnom putu, u pojedinim trenucima vremena prisutan je samo jedan od signala, za razliku od frekvencijskog multipleksiranja, kada su u kanalu prisutni svi signali koji se multipleksiraju. Na slici 4.15 grafički je predstavljen princip vremenskog multipleksiranja sa šest različitih kanala, vremenski razdvojenih (prikazano na vremenskoj osi t), istih opsega učestanosti (prikazano na frekvencijskoj osi f), čiji se prenos vrši kroz jednu zajedničku liniju veze. Sa k_i ($i = 1, 2, 3, 4\dots$) označeni su kanali kojima se prenose odgovarajući signali.

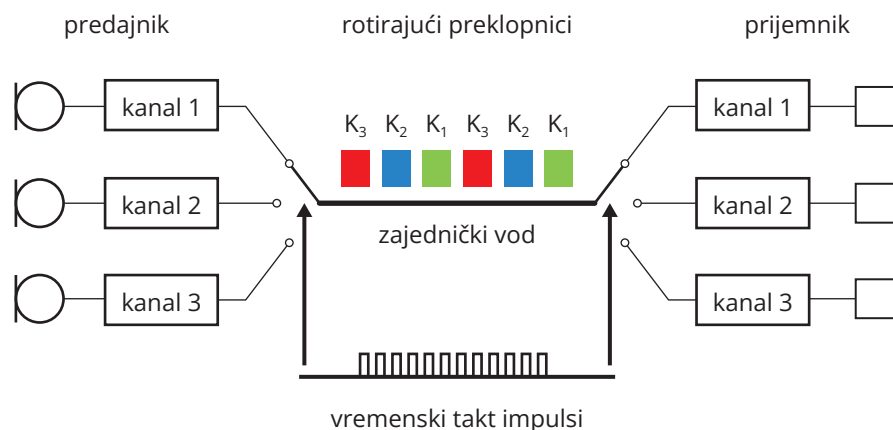


Slika 4.15. Grafička predstava multipleksiranja sa vremenskom raspodjelom kanala

ZANIMLJIVOST

Kolika je dužina intervala ponavljanja spajanja – u primjeru sa slike 4.15 – kako bi sagovornici na krajevima telefonskih linija imali utisak da se njihova komunikacija odvija bez ikakvih prekida? Ovo zavisi od psiho-fizičkih karakteristika ljudskog čula sluha (rezolucija uha). Uzima se da je ta vrijednost oko 300 ms.

Radi lakšeg razumijevanja, vremensko multipleksiranje može se prikazati rotirajućim prekidačem (komutatorom) na krajevima prenosnog puta, koje fizički spaja odgovarajuće parove kanala predajnika i prijemnika, na primjer telefonskog sistema, slika 4.16. Prekidači na predajnom i na prijemnom dijelu prenosnog sistema rotiraju istom brzinom i imaju isti početni položaj. Prekidači su međusobno sinhronizovani, odnosno rotiraju istom brzinom, i oni su u istoj fazi, odnosno počinju rotaciju iz istog položaja. Za povezivanje parova koristi se isti vod, ali su odgovarajući parovi predajnik – prijemnik međusobno spojeni samo u određenim vremenskim intervalima, koje diktiraju upravljački, odnosno takt-impulsi. Pošto je interval ponavljanja spajanja veoma kratak i odvija se velikom brzinom, dobija se utisak da se komunikacija odvija bez ikakvih prekida.



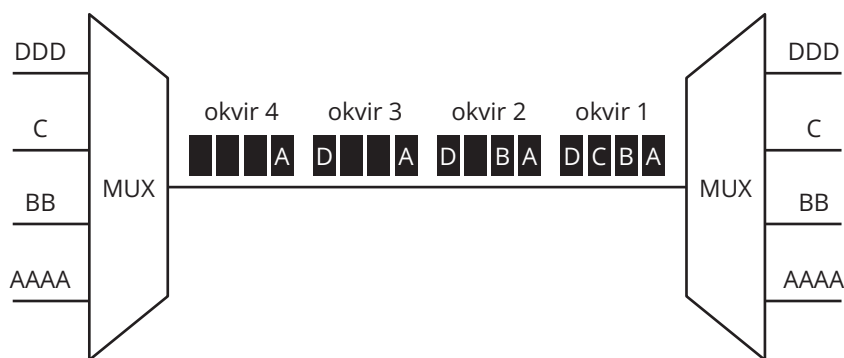
Slika 4.16. Prikaz vremenskog multipleksiranja rotirajućim prekidačima

Pomenuli smo takt-impulse. Oni su neophodni za sinhronizaciju parova predajnik – prijemnik, tj. potrebni su da se spriječi miješanje signala različitih izvora na zajedničkom kanalu. Takt-impulsi, koje generiše precizni sat (engl. *clock*), upravljaju vremenskim intervalima koji se dodjeljuju kanalima.

Na slici 4.17 prikazano je funkcionisanje četvorokanalnog vremenskog multipleksera sa četiri predajna i četiri prijemna kanala. Sa A, B, C i D označeni su nizovi bitova iz četiri izvora. Uređaj za multipleksiranje – multiplekser (MUX) uzima bitove iz različitih izvora podataka, smješta ih u prihvatne memorije – baferne. Baferi su memorije malog kapaciteta koje služe za privremeno čuvanje podataka. Baferi su pridruženi izvorima i prave odgovarajući okvir. Okvir se sastoji od četiri vremenska odsječka (slot), pri čemu se pozicija svakog slota namjenjuje određenom izvoru. Na primjer, prvi vremenski slot namijenjen je za smještanje bitova iz izvora D, drugi za smještanje bitova iz izvora C, treći za smještanje bitova iz izvora B, i četvrti za smještanje bitova iz izvora A. Broj bitova koji se mogu smjestiti u jedan odsječak unaprijed je utvrđen. Multiplekser smješta bitove iz bafera u odgovarajuće slotove, šalje okvir; a kada završi slanje, pristupa formiranju novog okvira na isti način. Ukoliko neki izvor u nekom vremenskom intervalu nema podataka za slanje, njegov slot će biti prazan.

Na slici se vidi da su u prvom okviru svi slotovi napunjeni, da u drugom okviru izvor C nije imao bitova za slanje, da treći okvir sadrži bitove poslate iz izvora A i D, i na kraju – da četvrti okvir sadrži samo bitove koje je emitovao izvor A.

Na prijemnoj strani prenosnog sistema vrši se obrnuti postupak. Prijemni multiplekser (demultiplekser) iz odgovarajućeg slota pristiglog okvira izdvaja primljene bitove i preusmjerava ih odgovarajućem prijemniku. Na primjeru sa slike, bitove iz prvog slota usmjeravaće prijemniku D, bitove iz drugog prijemniku C, iz trećeg prijemniku B i iz četvrtog slota prijemniku A.



Slika 4.17. Četvorokanalni vremenski multiplekser sa vremenskom raspodjelom kanala

U procesu generisanja okvira najvažnije je uskladiti brzine preuzimanja bitova od svih izvora (ulaznu brzinu) sa brzinom slanja okvira (izlaznom brzinom). Ako je, na primjer, ulazna brzina veća od izlazne, okviri će se generisati mnogo brže nego što se mogu proslijediti. Posljedica može da bude gubitak podataka ako multiplekser nema bafere dovoljne veličine da se smjeste ulazni bitovi. Sa druge strane, ako je ulazna brzina previše mala, odnosno ako izvorni bitovi pristižu suviše sporo, prenosni sistem biće nedovoljno iskorišćen. Optimalna je varijanta da ulazna brzina bude jednaka izlaznoj.

Izjednačavanje brzine generisanja okvira sa brzinom njihove otpreme rješava se statističkim multiplekserima. Statistički multiplekser ispituje ulazne bafere, koji su pridruženi odgovarajućim izvorima podataka, i u zavisnosti od toga koliko podataka oni sadrže, kreira okvire odgovarajućih dužina.

Iz izloženog možemo izvući važan zaključak:

Cijeli sistem multipleksiranja sa vremenskom raspodjelom kanala stavlja se u određenim vremenskim intervalima na raspolaganje samo jednom kanalu.

Ovo znači da se u jednom trenutku u zajedničkom kanalu nalazi samo jedan koristan signal. Podsjetimo se da se kod frekvencijskog multipleksa u jednom trenutku u kanalu nalaze svi korisni signali istovremeno.

Multipleksiranjem upravljaju takt-impulsi, i oni definišu kada koji od kanala dolazi na svoj red. Nije moguće da signali iz dva ili više kanala budu istovremeno prisutni u sistemu prenosa. Iz ove činjenice proizilazi jedna od ključnih prednosti sistema sa vremenskom u odnosu na sisteme sa frekvencijskom raspodjelom kanala. U sistemu frekvencijskog multipleksiranja, kako su signali u svim kanalima istovremeno prisutni u sistemu, između njih, usljed nesavršenosti elektronskih sklopova, može doći do miješanja signala iz različitih kanala, odnosno može doći do preslušavanja.

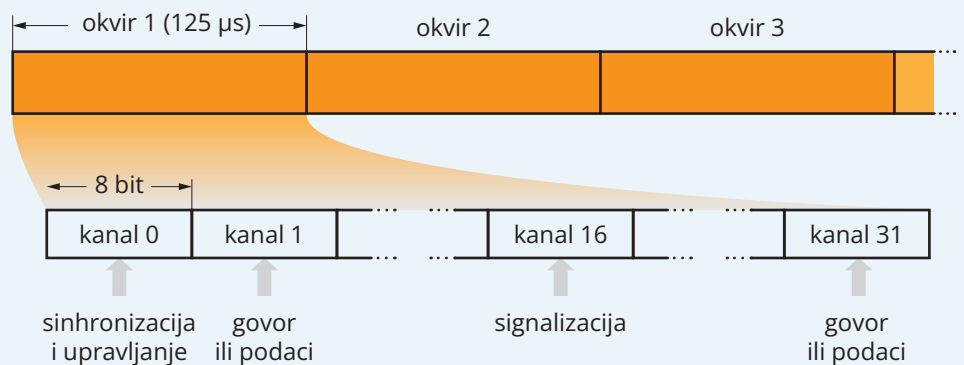
Sistemi sa vremenskim multipleksom otporni su na preslušavanje. Međutim, i oni imaju nedostatak u odnosu na sisteme sa frekvencijskom raspodjelom kanala. Naime, potrebno je precizno usklađivanje istovremenog rada predajnika i prijemnika, tj. potrebno je rješavanje problema njihove sinhronizacije.

Digitalni nosioci

U prethodnom izlaganju napomenuli smo da se kod vremenskog multipleksiranja formiraju okviri sastavljeni od vremenskih odsječaka. Trajanje okvira, odnosno vremenskog odsječka, propisuju odgovarajući standardi. Standardi propisuju organizaciju i arhitekturu sistema za multipleksiranje govornih kanala na velikim udaljenostima – digitalnih nosilaca. Danas postoje dva standardizovana sistema (evropski i američki). Osnovni okvir u oba standarda naziva se primarni multipleksni signal. Oba standarda imaju sličan koncept – zasnovani su na impulsnoj kodnoj modulaciji, PCM (*Pulse Code Modulation*).

PCM je tehnika koja se, između ostalog, koristi u postupku pretvaranja kontinualnog signala u digitalni oblik, odnosno u niz kratkotrajnih impulsa – uzoraka, što predstavlja prvu fazu digitalizacije kontinualnog signala. Ova tehnika ima primjenu u digitalnoj telefoniji, za audio-zapise kod personalnih računara, zapise kod CD-ova itd. Tehnika koristi multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala kojom se velik broj kanala kombinuje u jedan okvir.

U Evropi primarni multipleksni signal ili digitalni nosilac, koji se označava sa E1, čine 32 kanala brzine 64 kb/s, od kojih je 30 kanala namijenjeno za prenos informacija (govor, podaci), dok je po jedan kanal namijenjen za sinhronizaciju okvira odnosno za prenos signalizacionih podataka. Ukupan protok primarnog multipleksa iznosi $32 \cdot 64 \text{ kb/s} = 2048 \text{ kb/s}$, što je približno 2 Mb/s. Otuda se često primarni multipleks naziva dvomegabitni link.



Slika 4.18. Struktura E1 okvira

Na slici 4.18 prikazana je struktura okvira primarnog digitalnog signala brzine 2048 kb/s.

Pošto je najviša učestanost u spektru telefonskog signala $f_m = 4000$ Hz, perioda odabiranja u svakom kanalu iznosi $T = \frac{1}{2} \cdot f_m = 125 \mu\text{s}$, pa okvir traje $125 \mu\text{s}$. Okvir je podijeljen na 32 vremenska odsječka, koji se nazivaju slotovi. Svaki od njih traje $3,9 \mu\text{s}$ i sadrži po osam bita. Slotovi su numerisani od 0 do 31. Nulti interval predstavlja početak E1 okvira, i sadrži bitove za sinhronizaciju i upravljanje okvirom. Signal sinhronizacije okvira potreban je da bi prijemni uređaj mogao da odredi početak svakog okvira, tj. da bi preneseni bitovi mogli da se pravilno protumače na prijemnoj strani. Šesnaesti interval koristi se za prenos signalizacionih kriterijuma, koji se odnose na uspostavljanje poziva, raskidanje poziva i slično.

U SAD, Kanadi i Japanu primjenjuje se sličan standard. Digitalni nosilac, koji nosi oznaku T1, sastoji se od okvira podijeljenog na 24 vremenska odsječka – kanala. Svaki kanal sadrži osam bita, tako da je dužina okvira $8 \cdot 24 = 192$ bita.

S obzirom na to da se u Evropi koristi evropski standard, u daljem tekstu isključivo ćemo razmatrati digitalne nosioce E1.

Tendencija za boljim korišćenjem prenosnog puta većeg od 30 kanala uz primjenu vremenskog multipleksiranja, dovela je do potrebe da se uvedu i standardizuju hijerarhijski protoci bitova. ITU-T preporuka G.702 definiše hijerarhiju vremenskog multipleksa zasnovanu na E1 nosiocu, odnosno primarnom digitalnom protoku od 2048 kb/s. Evropsku hijerarhiju vremenskog multipleksiranja karakteriše faktor multipleksiranja 4 na prelazima ka višim hijerarhijskim nivoima. To praktično znači da se svaki viši hijerarhijski signal dobija multipleksiranjem četiri signala koji pripadaju prethodnom hijerarhijskom nivou. Četiri primarna signala E1 od 2048 kb/s, poslije multipleksiranja daju sekundarni multipleksni signal E2 brzine $4 \cdot 2048 = 8448$ kb/s. Sljedeći nivo u hijerarhiji jeste tercijarni multipleksni signal E3, sa brzinom $4 \cdot 8448 = 34368$ kb/s. Posljednji standardizovani signal u ovoj hijerarhiji jeste E4, čija je brzina 139264 kb/s.

Standardi za vremenski multipleks prikazani su u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Standardi hijerarhijskog nivoa E za vremenski multipleks sa odgovarajućim bitskim brzinama, brojem govornih kanala i faktorom multipleksiranja

Hijerarhijski nivo	Bitska brzina (kb/s)	Broj govornih kanala	Faktor multipleksiranja
	64	1	
E1	2048	30	30
E2	8448	120	4
E3	34368	480	4
E4	139264	1920	4

U praksi se bitske brzine multipleksnih signala navode u skraćenom obliku, kao 2 Mb/s, 8 Mb/s, 34 Mb/s i 140 Mb/s.

Navedena hijerarhija u literaturi se naziva pleziona digitalna hijerarhija – PDH. Da bismo objasnili termin pleziona, podsjetimo se da vremenskim intervalima kod vremenskog multipleksiranja upravlja precizan časovnik, koji generiše takt-impulse. Dva ili više digitalnih signala pleziona su kada su im bitske brzine nominalno iste (npr. 8448 kb/s), dok im bitske brzine komponenti koje ih formiraju (npr. 2048 kb/s) mogu odstupati u okviru neke dozvoljene tolerancije. Da bi se izvršilo multipleksiranje pleziona sekvenci, neophodno ih je dovesti na zajednički takt, koji se generiše u multipleksnom uređaju.

Razvoj optičkih telekomunikacija uslovio je potrebu za standardizacijom protoka većih od onih definisanih u postojećim hijerarhijama, kao i za standardizacijom povezivanja opreme različitih proizvođača preko optičkih interfejsa. Razmišljanja su usmjerena u pravcu sinhrona digitalne multipleksne tehnike. U SAD je kreiran novi standard – SONET (*Synchronous Optical NETWORK*, sinhrona optička mreža), koji je definisao protoke, formate signala i optičke interfejse za novu hijerarhiju vremenskog multipleksiranja.

Zemlje sa evropskom hijerarhijom multipleksiranja uključile su se u ovaj razvoj tako što su uzeli da SONET bude osnova za dalju hijerarhiju, koja će biti usklađena sa evropskim PDH standardima. Tako je nastala nova hijerarhija vremenskog multipleksiranja u optičkim telekomunikacijama, sinhrona digitalna hijerarhija – SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*).

U čemu je značaj SDH? Sa stanovišta veličine protoka podataka, telekomunikacionu mrežu čine transportni dio (kroz koji se ostvaruje velik bitski protok i prenos informacija na velika rastojanja) i pristupni dio (kroz koji se ostvaruje protok nižeg intenziteta na relativno kratkim rastojanjima i do krajnjeg korisnika). Iako su transportna i pristupna mreža djelovi jedinstvenog sistema, zbog njihovih specifičnosti i razlika moguće ih je razmatrati nezavisno.

SDH je tehnologija transportnog dijela telekomunikacionog sistema. Jeftinija je od tehnologije PDH. Tehnike multipleksiranja i demultipleksiranja su jednostavnije. Dalje, SDH obezbjeđuje veće propusne opsege pri prenosu optičkim vlaknima. Zahvaljujući poboljšanim protokolima održavanja, omogućeno je i brže otklanjanje kvarova. Osim toga, tehnologija SDH omogućava da se tokovi podataka male brzine kombinuju sa tokovima podataka velike brzine. Nadalje, omogućava korisnicima da relativno lako ugrađuju i izdvajaju pojedinačne tokove bitova iz tokova podataka visoke brzine. Ovo su i ključne prednosti tehnologije SDH nad PDH.

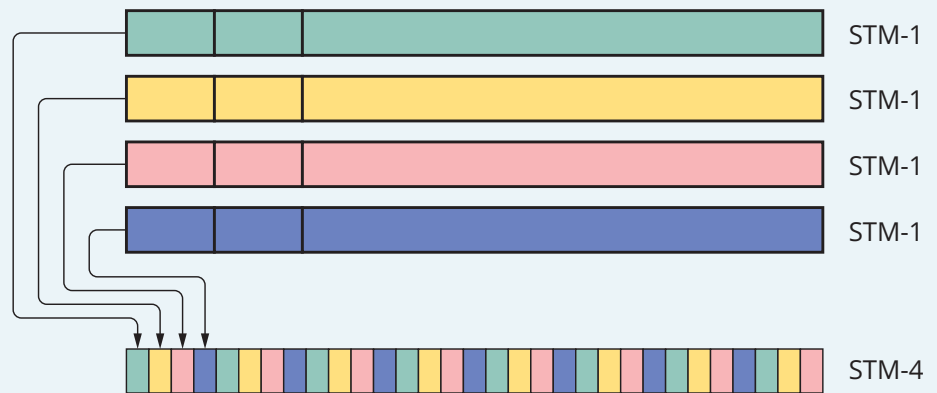
Osnovni nivo u SDH jeste signal čija je bitska brzina 155520 kb/s, i koji se naziva STM-1 (*synchronous transfer module 1*). Bitske brzine signala na višim hijerarhijskim nivoima formiraju se kao cjelobrojni faktor, odnosno

umnožak bitske brzine signala STM-1. U tabeli 4.2 prikazani su hijerarhijski nivoi SDH, sa odgovarajućim bitskim brzinama.

Tabela 4.2. Hijerarhijski nivoi SDH sa odgovarajućim bitskim brzinama

Hijerarhijski nivo	Naziv SDH signala	Bitska brzina (kb/s)
1	STM-1	155 520
4	STM-4	622 080
16	STM-16	2 488 320

U kanalima mogu biti električni ili optički signali. Svaki SDH standard ima četiri nivoa, tako da svaki nivo ima sopstvene protokole. Na slici 4.19 prikazan je postupak SDH multipleksiranja, sa četiri signala prvog hijerarhijskog nivoa SDH signala u oznaci STM-1, čija je bitska brzina 155520 kb/s.



Slika 4.19. SDH multipleksiranje

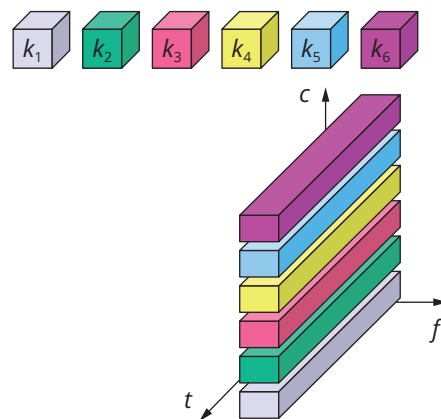
SDH vremensko multipleksiranje omogućava dobijanje četvrtog hijerarhijskog nivoa SDH signala u oznaci STM-4, čija je bitska brzina četiri puta veća od brzine prvog hijerarhijskog nivoa SDH signala u oznaci STM-1, i iznosi $4 \cdot 155520 \text{ kb/s} = 622080 \text{ kb/s}$.

4.2.3. Kodno multipleksiranje (CDM)

Kodirani višestruki pristup zasnovan je na kodnom multipleksiranju. Da bismo razumjeli suštinu ovog načina multipleksiranja, zamislimo da se nalazimo u manjoj prostoriji sa više ljudi koji međusobno glasno razgovaraju. Kako svi govore u isti glas, niko nikoga neće razumjeti. Ako sada zamislimo situaciju da u istoj prostoriji ljudi međusobno glasno razgovaraju, ali na različitim jezicima, onda će oni koji govore istim jezikom moći će da se razumiju. Ovaj model je osnova kodnog multipleksa: učesnicima u komunikaciji po zajedničkom kanalu dodjeljuje se različit jezik sporazumijevanja, odnosno različit kôd. Korisnici zajedničkog koda međusobno se razumiju, ostale signale tretiraju kao signale šuma.

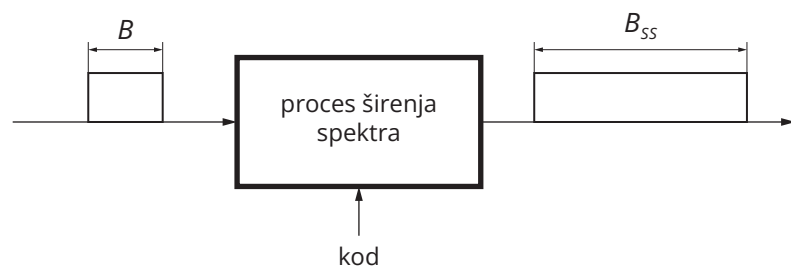
Kodno multipleksiranje je novija tehnika u komercijalnim komunikacijama. Svi kanali u istom trenutku prenosa koriste istu frekvenciju. Svakom kanalu dodjeljuje se sopstveni kôd, čime se signali razdvajaju radi bezbjednosti prenosa. Ova tehnika danas se koristi kod bežičnog prenosa, posebno u mobilnoj telefoniji, radi dobre zaštite od interferencije i ometanja signala. Nedostatak ove tehnike prenosa jeste složenost prijemnika u onom dijelu u kojem se razdvajaju korisni signali po kanalima. Osim toga, zahtijeva preciznu sinhronizaciju u radu predajnika i prijemnika.

Na slici 4.20 grafički je predstavljen princip kodnog multipleksiranja, sa šest različitih kanala razdvojenih po kodnoj osi c , čiji prenos se vrši kroz jednu zajedničku liniju veze. Sa k_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) označeni su kanali kojima se prenose odgovarajući signali, a sa c je označena kodna osa.



Slika 4.20. Grafička predstava multipleksiranja sa kodnom raspodelom kanala

Kodno multipleksiranje predstavlja tehniku prenosa **proširenim opsegom** (engl. *spread spectrum*). Ona se zasniva na postupku višestrukog proširenja opsega učestanosti u kojem se vrši prenos signala (slika 4.21). Signal osnovnog opsega B u ovom postupku se proširuje u novi, znatno širi opseg B_{SS} .



Slika 4.21. Opšti postupak proširenja spektra

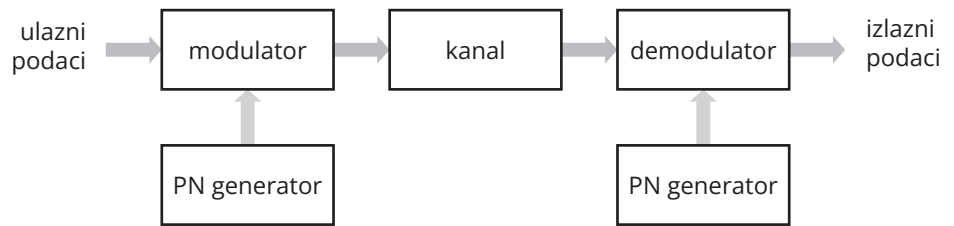
Tehnike proširenog spektra mogu se primjenjivati i na analogne i na digitalne signale. Razmotrićemo model digitalnog komunikacionog sistema koji radi u proširenom spektru, i koji je prikazan na slici 4.22. Model analognog komunikacionog sistema koji radi u proširenom spektru sličan je

NAPOMENA

Šenonova teorema i sistemi sa proširenim spektrom

Šenonova teorema kaže da brzina prenosa podataka zavisi od propusnog opsega B i logaritamskog odnosa signal/šum. Odnos signal/šum se, zbog fizičkih zakona, ne može značajno povećavati. Ako želimo povećati brzinu prenosa, onda nam na raspolaganju preostaje povećanje propusnog opsega. Kao rezultat ovakvog načina razmišljanja pojavili su se sistemi sa proširenim spektrom.

digitalnom, osim što na ulazu odnosno izlazu sistema ima sklopove za A/D i D/A konverziju.



Slika 4.22. Model digitalnog komunikacionog sistema u proširenom spektru

Ulazni podaci dovode se na modulator, u kojem se modulišu nosećim frekvencijama čije vrijednosti generiše generator pseudoslučajne kodne sekvence (engl. *pseudo-noise* – *PN*). Generatori pseudoslučajne kodne sekvence jesu sklopovi koji na svom ulazu imaju potpuno (stvarno) slučajne nizove podataka, a na izlazu daju slučajne nizove, ali koji se dobijaju uz pomoć odgovarajućih matematičkih funkcija. Dakle, nizovi na izlazu nijesu stvarno slučajni. Otuda u nazivu i prefiks pseudo, što znači lažan. Pseudoslučajne kodne sekvence na izlazu generatora po pravilu su duže od nizova na ulazu, uvijek su iste za iste ulazne nizove podataka; znači, mogu se predvidjeti.

Zbog toga što se osnovni signal moduliše nosiocima različitih frekvencija, na izlazu modulatora dobija se signal znatno većeg propusnog opsega u odnosu na ulazni. Korisnici su međusobno razdvojeni jedinstvenim pseudoslučajnim sekvencama ili kodovima.

Da bi se, na strani prijemnika, poslani podaci pravilno rekonstruisali, pri procesu demodulacije moraju se koristiti signali istih nosećih učestanosti. To praktično znači da niz vrijednosti koje generišu PN-generatori, moraju biti isti i na predajnoj i prijemnoj strani komunikacionog sistema. Na taj način predajnik i prijemnik usklađuju se na rad na istoj učestanosti, tj. vrši se njihova sinhronizacija.

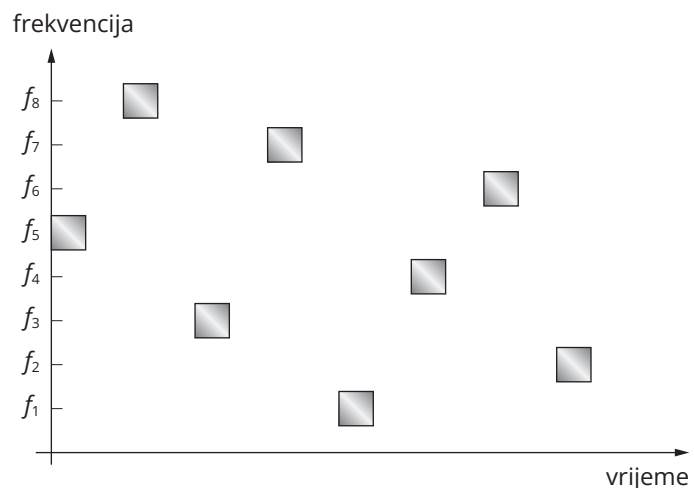
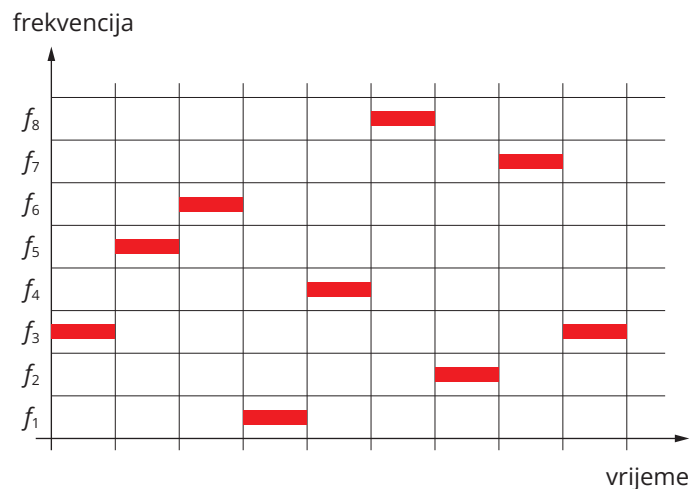
Osim osnovnih razloga za primjenu tehnike sa proširenim spektrom, treba napomenuti da primjena ove tehnike povećava otpornost signala na smetnje prouzrokovane prostiranjem signala višestrukim putanjama. Pri bežičnom prenosu signala, osim direktnog signala sa predajnika, do prijemnika može da dođe i signal reflektovan od neke prepreke. Zbog različitog puta, direktni i reflektovani signali mogu da pristignu do prijemnika u različitim trenucima, i na taj način ometu korisni, direktni signal. Međutim, ovaj tip smetnji obično se javlja na uskim opsezima učestanosti. Zbog toga smetnje prouzrokovane prostiranjem signala višestrukim putanjama znatno manje utiču na signale sa znatno većim propusnim opsezima, koji se prenose u proširenom spektru.

Za prenos signala u proširenom spektru najčešće se koriste dvije metode: (1) frekvencijsko skakanje – FH (engl. *frequency hopping*) ili FHSS (*frequency*

hopping spread spectrum) i (2) direktna sekvenca DSSS (*direct sequence spread spectrum*).

Kod metode frekvencijskog skakanja (FHSS), predajnik neprekidno mijenja frekvenciju nosioca predajnog signala da bi izbjegao ometanje. Ovi frekvencijski skokovi dešavaju se po pseudoslučajnom zakonu, istovremeno u kolima predajnika i prijemnika. Ako se, na primjer, frekvencija nosioca mijenja između N različitih frekvencija, tada se i propusni opseg povećava N puta u odnosu na osnovni.

Na slici 4.23 prikazana su dva primjera tehnike frekvencijskog skakanja koji se koriste pri prenosu signala. Frekvencije se mijenjaju po pseudoslučajnoj sekvenci od osam frekvencija, za prvi slučaj prenosa *a*): $f_3, f_5, f_6, f_1, f_4, f_8, f_2$ i f_7 , a u drugom slučaju prenosa *b*), pseudoslučajna sekvenca je: $f_5, f_8, f_3, f_7, f_1, f_4, f_6$ i f_2 , nakon čega se vrši povratak na prvu frekvenciju f_3 , odnosno f_5 .



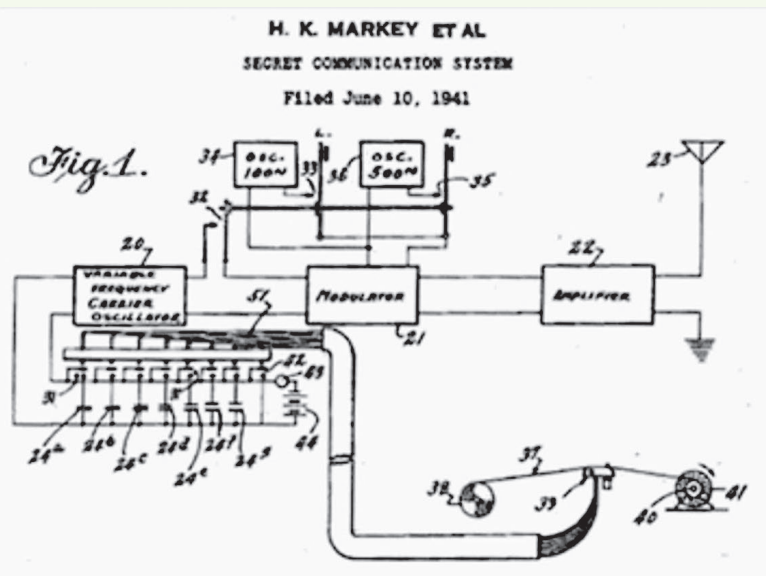
Slika 4.23. Primjeri prenosa signala u proširenom spektru metodom frekvencijskog skakanja za dvije pseudoslučajne sekvence

ZANIMLJIVOST

Jedna od najpoznatijih holivudskih glumica **Hedi Lamar** (1914–2000), porijeklom iz Austrije, nije imala nikakvo formalno naučno obrazovanje, i sve što je o naučnim dostignućima znala, naučila je od bivših muževa. Za vrijeme II svjetskog rata saznala je kako mornarica SAD koristi navođena torpeda koja često promaše cilj, jer im Njemci ometaju radio-signale za navođenje. Koristeći radove svoga prethodnog muža, austrijskog vojnog inženjera, došla je na ideju da bi bilo moguće proizvesti mehanizam koji bi u nekom zadatom opsegu mijenjao frekvenciju radio-sigнала na neki nasumičan način. Na taj način spriječilo bi se ometanje signala kojim se torpeda navodi. Ovaj izum patentirala je u SAD 1942. godine pod nazivom „Sistem tajne komunikacije“. Njen patent nije ugrađen u

sistem za navođenje torpeda zbog toga što to tada nije bilo tehnički izvodljivo, a i zato što nijesu ozbiljno shvatili značaj pronalaska jedne glumice. Patent je pao u zaborav, sve dok nijesu počela projektovanja digitalnih bežičnih mreža. Danas se njen patent, kao preteča sistema sa frekvencijskim skakanjem, široko primjenjuje kod profesionalnih sistema radio-veze, sistema mobilne telefonije i drugih sistema bežičnog prenosa. Austrija, Njemačka i Švajcarska slave 9. novembar, dan rođenja Hedi Lamar, kao Dan pronalazača.

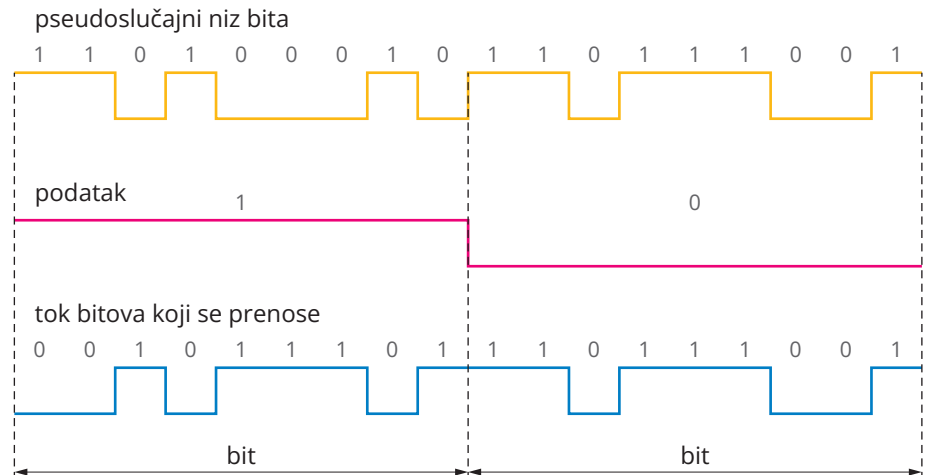
Na slici je prikazana originalna šema patenta, tu je i fotografija glumice.



Kod metode direktne sekvence (DSSS), svaki bit izvornog podatka na predajnoj strani definiše se pomoću određenog broja bitova, pri čemu se za generisanje tih bitova koristi pseudoslučajni kôd. Korišćenjem većeg broja bitova povećava se i propusni opseg. Tako, na primjer, ako se osnovni bit signala kodira sa 10-bitnim pseudokodom, onda će mu se i frekvencijski opseg povećati 10 puta.

Tehnika koja se koristi kod DSSS-a bazira se na kombinovanju niza podataka sa pseudoslučajnim nizom bitova, koristeći XOR (isključivo ILI kolo, ili kolo ekskluzivne disjunkcije) logičku funkciju. XOR je složeno logičko kolo sa najčešće dva ulaza i jednim izlazom. Izlaz iz XOR kola daje logičku jedinicu u slučaju da bitovi na ulazu imaju različite vrijednosti (0 ili 1). Ako bitovi na ulazu kola imaju istu vrijednost, onda će na izlazu XOR kola biti logička nula. Logičke vrijednosti 0 i 1 odgovaraju binarnim vrijednostima – ciframa 0 i 1, pa se ovo kolo koristi i za sabiranje binarnih brojeva.

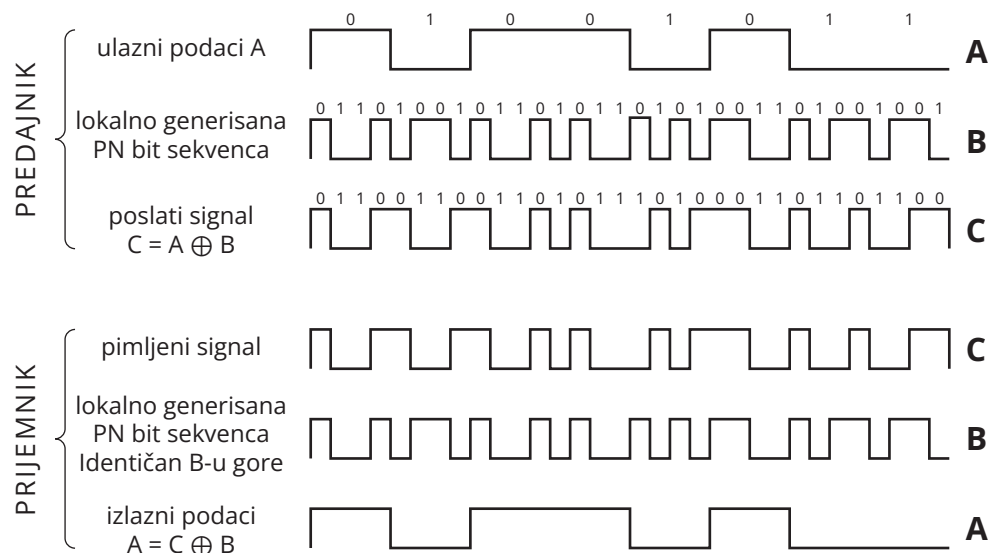
Na slici 4.24 grafički je opisana metoda direktne sekvence na predajnoj strani komunikacionog kanala.



Slika 4.24. Primjer DSSS metode na predajnoj strani veze

Na prijemnoj strani imamo obrnut postupak. Tok bitova koji se prima, dovodi se na jedan od ulaza XOR kola u prijemniku, dok se na drugi ulaz dovodi pseudoslučajan niz bitova. Da bi se na izlazu XOR kola na prijemnoj strani veze dobili originalni podaci, pseudoslučajan niz bitova koji se generiše u prijemniku mora biti istovjetan sa ovim nizom koji se generiše na predajnoj strani. To znači da generatori pseudoslučajnih bitova u predajniku i prijemniku moraju biti sinhronizovani.

Na slici 4.25 grafički je opisana metoda direktne sekvence na predajnoj i prijemnoj strani veze komunikacionog kanala.



Slika 4.25. Primjer DSSS metode na predajnoj i prijemnoj strani veze komunikacionog kanala

PRIMJENA U PRAKSI

Zaštićene radio-veze. Razmotrimo jednu radio-vezu. Da bi se ona mogla ostvariti, potrebno je da se i predajnik i prijemnik podese na istu učestanost. Kako se signal prostire slobodnim prostorom, ukoliko nije šifrovan, svako ko svoj prijemnik podesi na istu učestanost može presretati ili ometati komunikaciju. Sada zamislimo da predajnik i prijemnik

međusobno ne komuniciraju na jednoj, već na različitim učestanostima, koje se stalno mijenjaju. U ovom slučaju neovlašćeni učesnik u vezi ne može presretati komunikaciju, jer ne zna na kojoj se učestanosti ona ostvaruje.

Dakle, primjenom tehnike sa proširenim spektrom omogućuje se zaštićena komunikacija. Zbog toga su savremeni vojni i policijski sistemi radio-veza, namijenjeni za komunikaciju na velikim udaljenostima, zasnovani na tehnici proširenog spektra.

DODATAK +

CDMA

Jedna od najpoznatijih klasa kodnog multipleksiranja jeste kodirani višestruki pristup (**C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess, CDMA). Kodirani višestruki pristup koristi se se u tehnikama mobilnog bežičnog prenosa, posebno u mobilnim telefonskim mrežama. Ova tehnika dozvoljava svakom mobilnom terminalu da pri predaji signala koristi čitav raspoloživi frekvencijski opseg. Da pri istovremenom emitovanju ne bi dolazilo do miješanja signala više terminala, kanali se razdvajaju drugačijim kodiranjem.

Kako se u praksi vrši ovo razdvajanje kanala? U sistemu CDMA trajanje svakog bita dijeli se na određen broj, obično 64 ili 128, kratkih podintervala (engl. *chips*). Svakom terminalu – odnosno njegovoj SIM kartici (*subscriber identity module*, pretplatnički identifikacioni modul), koja skladišti potrebne informacije koje identifikuju mobilni uređaj i kojom se terminal priključuje na mrežu – dodjeljuje se odgovarajuća jedinstvena sekvenca podintervala. Ta sekvenca ne može se birati proizvoljno, već zavisi od sekvenci koje se dodjeljuju ostalim terminalima.

Rezime

- ▶ Signali koji se prenose telekomunikacionim sistemom mogu biti analogni i digitalni.
- ▶ U zavisnosti od smjera komunikacije, komunikacija može biti simpleksna, poludupleksna i dupleksna; u zavisnosti od broja puteva prenosa podataka serijska i paralelna; u zavisnosti od načina usklađivanja rada postoji asinhroni i sinhroni režim prenosa podataka; u zavisnosti od broja prijemnih stanica unicast, broadcast i multicast.
- ▶ Signali se telekomunikacionim sistemom prenose u svom osnovnom opsegu učestanosti ili u transponovanom opsegu učestanosti. Transponovanje opsega učestanosti ostvaruje se postupcima modulacije.
- ▶ Multipleksiranje je tehnika koja se koristi za prenos više nezavisnih signala preko jedne komunikacione linije, odnosno jednog prenosnog sistema. Tehnikom multipleksiranja, kanal se dijeli po vremenu i frekvenciji. Sistemi multipleksiranja mogu se podijeliti u tri glavne grupe: multipleksiranje sa frekvencijskom raspodjelom kanala, kodno multipleksiranje i multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala.
- ▶ Suština frekvencijskog multipleksiranja jeste da se raspoloživi opseg frekvencija potreban za prenos signala, podijeli na više grupa, odnosno kanala, kojima se informacije prenose nezavisno jedna od druge.
- ▶ Vremenski multipleks omogućuje prenos signala iz više izvora po zajedničkom prenosnom putu tako što se izvorima informacije dodjeljuju određeni trenuci u kojima im je dopušteno da mogu emitovati signal.
- ▶ Kod kodnog multipleksa učesnicima u komunikaciji se, po zajedničkom kanalu, dodjeljuje različit jezik sporazumijevanja, odnosno različit kôd.

Manje poznate riječi

sinhrono – istovremeno, jednovremeno, usklađeno po vremenu, biti u korak; asinhrono – neistovremeno, nesinhronizovano, neusklađeno po vremenu;

preambula – uvod; sekvenca – niz; pseudo – prvi dio složene riječi koji označava nešto lažno, prividno, tobožnje; interpretirati – tumačiti, objašnjavati, izvesti.

Preporuka za korišćenje dodatne literature

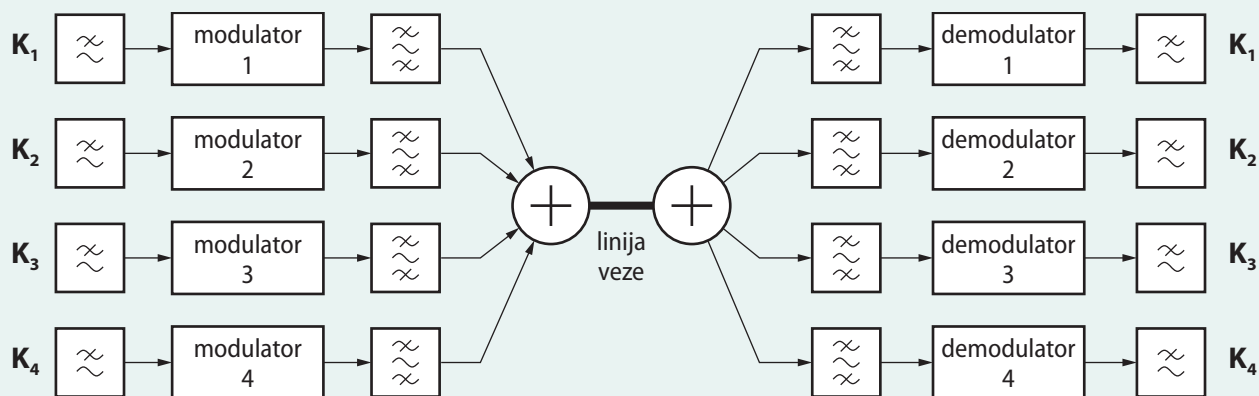
Ukoliko želiš da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *William Shay: Komunikacione tehnologije i mreže, autorizovani prevod sa engleskog jezika*

u izdanju Kompiuterske biblioteke, 2004. Multipleksi i tehnike za prenos digitalnih signala detaljno su obrađene u ovoj knjizi.

Pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Nabroj i objasni kriterijume po kojima se definišu vrste prenosa signala.
2. Navedi i opiši karakteristike osnovnih vrsta multipleksnog prenosa signala.
3. U jednoj prostoriji glasno razgovara više grupa ljudi. Kako bi ljudi mogli razgovarati bez međusobnog ometanja, predloži modele organizacije koji liče na tehnike frekventijskog, vremenskog i kodnog multipleksa.
4. Sistem za prenos signala u proširenom spektru koristi DSSS tehniku. Generator pseudoslučajnog koda generiše sekvencu bitova 110001101. Predajnik šalje podatak 010. Kako izgleda tok bitova na liniji veze?
- 5.* Nacrtaj blok-šemu predajnog i prijemnog dijela telekomunikacionog sistema sa frekventijskom raspodjelom četiri govorna signala i objasni ulogu pojedinih blokova u sistemu.

Rješenje: Na sljedećoj slici prikazana je blok-šema telekomunikacionog sistema predajnika i prijemnika sa frekventijskom raspodjelom četiri govorna signala:

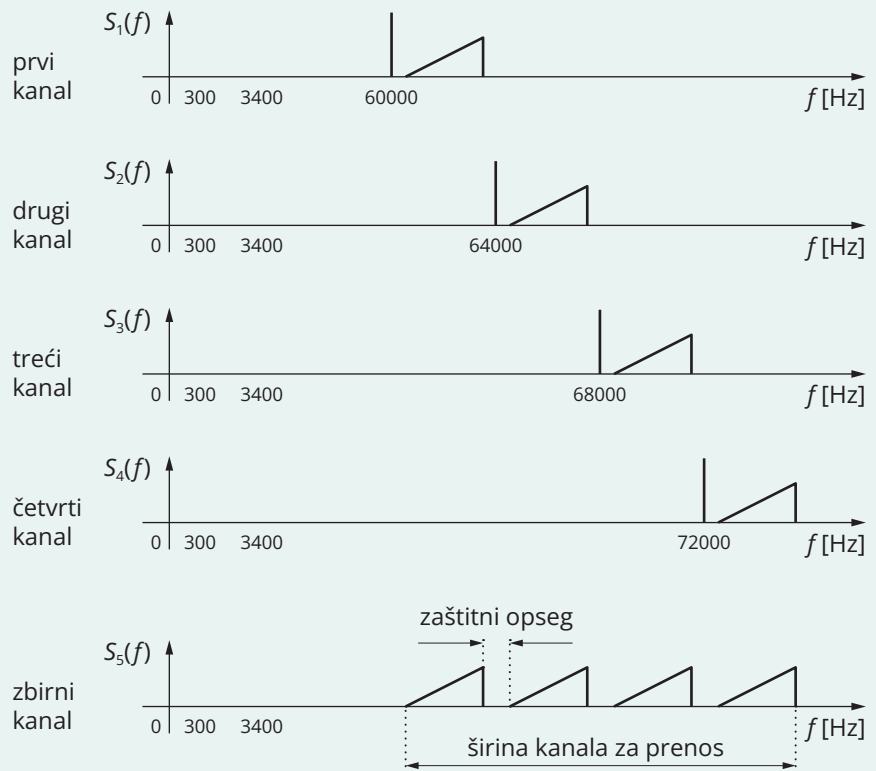


Predajnik (sklop lijevo) ima četiri predajna kanala, za svaki govorni signal po jedan, označena sa K_1, K_2, K_3 i K_4 . Govorni signali dovode se na NF filter koji filtrira ulazni signal u granicama govornog signala. Svaki predajni kanal ima svoj modulator, kojim se filtrirani govorni signal pomjera u više frekventno područje. Širina spektra modulisanog signala treba da bude jednaka ili veća od širine govornog signala, uvećanog za zaštitni opseg između spektara modulisanog signala. PPF predstavlja pojasnopropusni filter koji propušta modulirani signal u opsegu koji je pogodan za prenos na zajednički kanal. Svi signali se sabiraju - multipleksiraju na zajedničku liniju veze i prenose preko nje. Na ulazu u prijemnik svi predajni signali dovode se na demultiplekser, koji razdvaja predajne signale po prijemnim kanalima, što odgovara obrnutom načinu rada od predajnog multipleksera. Prijemnik ima

takođe četiri prijemna kanala i sklopove koji vrše obrnutu operaciju od predajnih kanala. Demodulatori vraćaju VF modulirani prijemni signal u osnovni opseg, odnosno vrše obrnutu operaciju od modulatora. Takav signal dovodi se na NF filter po svakom kanalu, a zatim se vodi do korisnika informacija.

- 6.* Nacrtaj spektre signala telekomunikacionog sistema sa frekvencijskom raspodelom kanala koji je blokovski prikazan na slici iz prethodnog zadatka.

Rješenje: Na sljedećoj slici prikazan je spektar govornih signala po kanalima i spektar zbirnog signala na zajedničkoj liniji veze.



Na slici iz prethodnog zadatka prikazan je postupak frekvencijske raspodjele kanala za četiri govorna signala, čija je širina spektra $B = 3400 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz} = 3100 \text{ Hz} = 3,1 \text{ kHz}$. Zbog zaštitnog opsega, modulirani signali moraju biti na zajedničkoj liniji sa razmakom do 10% od širine spektra korisnog signala u kanalu, što bi značilo da bi prvi modulirani signal nosilac mogao biti: $3,1 \text{ kHz} + 10\% \cdot 3,1 \text{ kHz} = 3,41 \text{ kHz}$. Radi jednostavnijeg definisanja širina spektra signala po kanalima, uzećemo razliku između frekvencija moduliranih signala nosilaca po kanalima 4 kHz (60 kHz, 64 kHz, 68 kHz i 72 kHz). Svaki govorni signal dovodi se na zaseban kanal. Poslije filtriranja u prvom kanalu, postupkom modulacije govorni signal pomjera se u frekvencijsko područje od 60,3 kHz do 63,4 kHz. Imajući u vidu da je širina govornog signala 3,1 kHz, prostor do 4 kHz dovoljan je za zaštitu govornih signala od

preklapanja. Zbog toga je prvi signal modulisan nosiocem od 60 kHz. U drugom kanalu, drugi govorni signal pomjera se u frekvencijsko područje od 64,3 kHz do 67,4 kHz, što znači da je u drugom kanalu signal modulisan nosiocem od 64 kHz. U trećem kanalu, treći govorni signal se pomjera u frekvencijsko područje od 68,3 kHz do 71,4 kHz, pa je u ovom u kanalu signal modulisan nosiocem od 68 kHz. U četvrtom kanalu govorni signal se pomjera u frekvencijsko područje od 72,3 kHz do 75,4 kHz, pa je signal u četvrtom kanalu modulisan nosiocem od 72 kHz. Na zajedničkoj liniji veze pojavljuje se zbirni spektar četiri govorna signala sa tri zaštitna opsega između spektara govornih signala.

- 7.* Izračunaj minimalnu širinu kanala za prenos četiri govorna signala iz prethodnog zadatka, pri frekvencijskoj raspodjeli kanala telekomunikacionog sistema, kao i veličinu zaštitnog opsega. Od čega zavisi ukupan broj multipleksiranih poruka pri frekvencijskoj raspodjeli kanala telekomunikacionog sistema?

Rješenje: Širina kanala za prenos četiri govorna signala pri frekvencijskoj raspodjeli kanala iz prethodnog zadatka računa se kao razlika frekvencija između granične frekvencije signala na četvrtom kanalu i granične frekvencije signala na prvom kanalu. Prva frekvencija dobija se tako što se signal nosilac po četvrtom kanalu sabere sa desnom graničnom frekvencijom govornog signala: $f_1 = 72 \text{ kHz} + 3,4 \text{ kHz} = 75,4 \text{ kHz}$. Druga frekvencija dobija se tako što se frekvencija signala nosioca po prvom kanalu sabere sa lijevom graničnom frekvencijom prvog govornog signala: $f_2 = 60 \text{ kHz} + 300 \text{ Hz} = 60,3 \text{ kHz}$. Širina kanala za prenos je:

$$B = f_1 - f_2 = 75,4 \text{ kHz} - 60,3 \text{ kHz} = 15,1 \text{ kHz}.$$

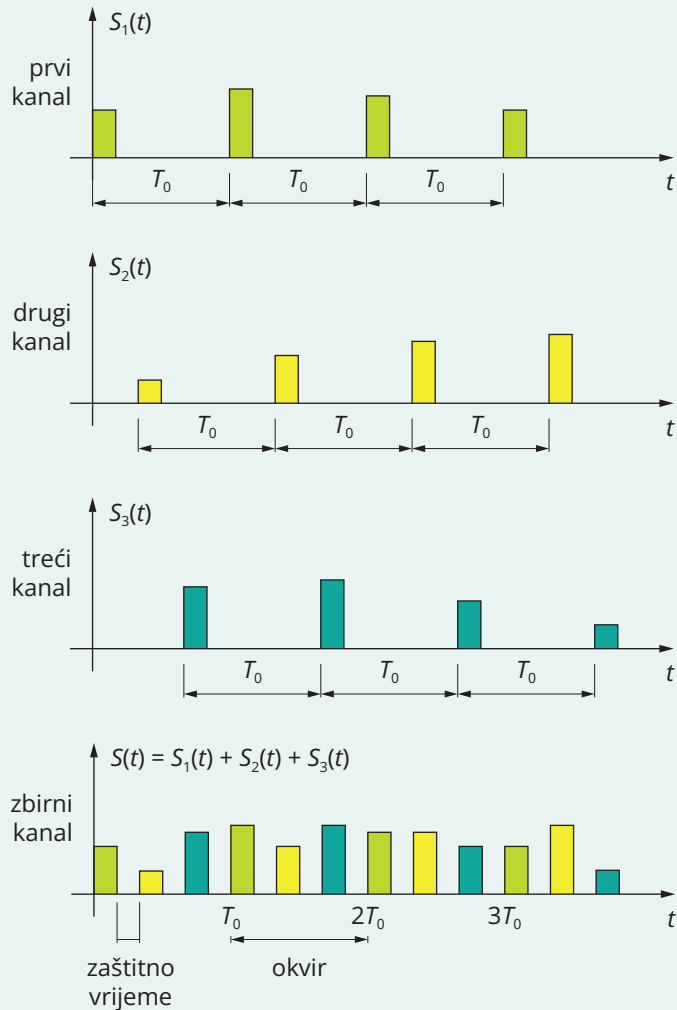
Imajući u vidu da je širina govornog signala u kanalu 3,1 kHz, može se zaključiti da se četiri ovakva govorna signala mogu raspodijeliti u kanalu čija je širina 15,1 kHz. Veličina zaštitnog opsega uzima se kao 10% od širine opsega jednog kanala, što je u tom slučaju 310 Hz. U našem slučaju imamo tri zaštitna opsega, jedan manje od ukupnog broja signala koji se multipleksiraju, pa veličina zaštitnog opsega iznosi:

$$B_1 = 3 \cdot 310 \text{ Hz} = 930 \text{ Hz}.$$

Ukupan broj multipleksiranih poruka pri frekvencijskoj raspodjeli kanala zavisi od: širine zajedničke linije za prenos ukupnog signala (što je širina propusnog opsega linije veća – veći je broj multipleksiranih poruka) kao i od širine spektra korisnog signala koji se multipleksira. Da bi broj multipleksiranih signala bio veći, zaštitni opseg uzima se najviše 10% od širine kanala, čime se onemogućava preklapanje signala a povećava ukupan raspoloživi prostor u kanalu za multipleksiranje više nezavisnih poruka.

8.* Nacrtaj vremenski oblik signala u slučaju trokanalnog multipleksa sa vremenskom raspodjelom kanala.

Rješenje: Na sljedećoj slici prikazan je vremenski oblik signala u slučaju trokanalnog multipleksa sa vremenskom raspodjelom kanala.



Vremensko multipleksiranje omogućuje prenos signala iz više izvora po zajedničkom prenosnom putu. Izvorima informacija dodjeljuju se određeni trenuci u kojima im je dopušteno da mogu da emituju signal. Sa slike se vidi da su na prvom kanalu prisutna četiri elementa (uzorka) signala koji se javljaju periodično u određenim vremenskim intervalima T_0 . Drugi signal također ima četiri elementa, ali su oni definisani u različitim vremenima u odnosu na prvi kanal, također sa istom periodom odnosno trenucima kada se javljaju uzorci signala. Slična je situacija i u trećem kanalu. Na zbirnom kanalu prikazani su svi elementi signala iz tri različita kanala. Između elemenata signala postoji zaštitno vrijeme da ne bi došlo do preklapanja signala. Uzorci signala grupišu se u okvire (ramove). Okvir sadrži po jedan element od sva tri predajna kanala. Okviri se ponavljaju sve dok se ne prenese svaki element signala na predajnim kanalima.



5. Medijumi za prenos signala

Usvajanjem sadržaja iz ovog poglavlja, moći ćeš da:

- opišeš vrste i karakteristike medijuma za prenos (telekomunikacioni kablovi – kabl sa upredenim bakarnim paricama, koaksijalni kabl i kabl sa optičkim vlaknom i bežični medijum)
- opišeš specifičnosti telekomunikacionih sistema u zavisnosti od medijuma za prenos
- izračunaš osnovne parametre telekomunikacionih kablova (otpornost, slabljenje na liniji veze i domet)
- izračunaš osnovne parametre za bežični medijum (slabljenje i domet).



Poruka generisana u telekomunikacionom sistemu i namijenjena za prenos, ne može se prenositi u formi u kojoj je generisana, već se mora pretvoriti u oblik pogodan za prenos koji smo nazvali signal. Signal se od predajnika do prijemnika prenosi fizičkim medijumom. Mnogi međusobno različiti tipovi medijuma koriste se kao prenosni sistemi. To mogu biti fizički vodovi – bakarni provodnici ili optička vlakna, i takvi medijumi nazivaju se vođeni medijumi za prenos signala. Primjeri vođenih medijuma su bakarna parica i koaksijalni kabl, kroz koje se signal prenosi u formi električnog signala. Sljedeći primjer vođenog medijuma jeste optičko vlakno, kroz koje se signal prenosi u obliku svjetlosnih impulsa. Signali se mogu prenositi i slobodnim prostorom, koji se u literaturi često označava kao nevođeni medijum. Kroz slobodan

prostor signali se prenose u formi elektromagnetnog (radio) talasa (EMT).

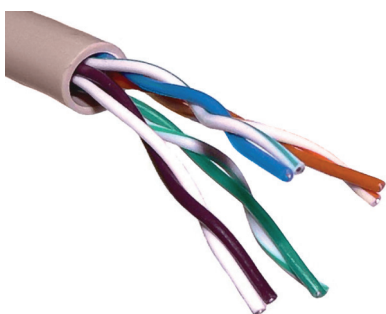
Brzina prostiranja signala kroz slobodni prostor jednaka je brzini svjetlosti, koja iznosi $300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Brzina prostiranja signala kroz metalne provodnike – upredenu paricu i koaksijalni kabl, kao i kroz optičko vlakno – nešto je veća od dvije trećine brzine propagacije elektromagnetnog zračenja kroz slobodni prostor, odnosno nešto veća od 200000 km/s .

Optičko vlakno kao medijum za prenos signala nudi mogućnost najvećih protoka podataka i velike otpornosti na spoljašnje smetnje. Ova vlakna omogućavaju prenos signala na velika rastojanja, 1000 i više puta veća u odnosu na bakarne provodnike.

5.1. Vođeni medijumi

5.1.1. Upredena parica

Dvije izolovane žice (par žica), najčešće napravljene od bakra, i međusobno spiralno isprepletene, čine upredenu paricu (engl. *twisted pair*). Kada kroz metalni provodnik protiče promjenljivi električni signal, onda on u susjednom provodniku, bez obzira na to što je od njega odvojen izolatorom, izaziva pojavu promjenljive struje. Ova pojava naziva se **elektromagnetna indukcija**. Pojava indukcije ima za posledicu prenos energije između susjednih provodnika, a samim tim i prenos informacije koju oni nose, što dovodi do **intrerferencije** signala. Interferencija je neželjena pojava u prenosu signala koja izaziva njegovo izobličenje i slabljenje. U telefoniji je ova pojava prepoznata kao **preslušavanje** (engl. *crosstalk*). Kada žice ne bi bile međusobno upredene, već npr. paralelne, onda bi interferencija bila takva da bi prenos bio praktično nemoguć. Da bi se ovaj problem riješio, žice se međusobno spiralno uvijaju (upredaju) kako bi se efekat indukcije što je moguće više oslabio. Što je upredanje gušće, to se više smanjuje mogućnost izobličenja i slabljenja signala. Određeni broj ovakvih parica smješta se u zajednički kabl, koji ima svoj zaštitni omotač.



Slika 5.1. Izgled kabla sa upredenim bakarnim paricama

Na slici 5.1 prikazan je kabl sa upredenim bakarnim paricama.

Karakteristike upredene parice zavise od vrste provodnika, veličine njegovog presjeka, dužine i rastojanja između navoja uvijanja – koraka upredanja.

Tabela 5.1. Specifične otpornosti nekih materijala

Materijal	Specifična otpornost ρ [Ωm] kod 20 °C
grafen	$1,00 \cdot 10^{-8}$
srebro	$1,59 \cdot 10^{-8}$
bakar	$1,68 \cdot 10^{-8}$
zlato	$2,82 \cdot 10^{-8}$
aluminijum	$2,60 \cdot 10^{-8}$
volfram	$5,90 \cdot 10^{-8}$
cink	$5,90 \cdot 10^{-8}$
nikal	$6,99 \cdot 10^{-8}$
željezo	$9,71 \cdot 10^{-8}$

Metalni provodnik pruža električni otpor električnoj struji koja kroz njega protiče. Zavisnost otpora (R) od površine poprečnog presjeka provodnika (S), dužine provodnika (l) i vrste materijala povezuje formula:

$$R = \rho l / S.$$

Veličina ρ naziva se specifična otpornost provodnog materijala. Izražava se jedinicom om-metar (Ωm). Metali imaju malu specifičnu otpornost. Što je metal bolji provodnik struje, to mu je i specifična otpornost manja. Zbog toga se za izradu upredenih parica najčešće koristi bakar, koji je dobar provodnik električne struje, a nije skup (kao npr. srebro, koje je bolji provodnik).

U tabeli 5.1 prikazane su specifične otpornosti nekih materijala.

Iz formule se vidi da deblji provodnik, tj. provodnik većeg poprečnog presjeka, ima manji otpor. Obično je prečnik provodnika koji se koristi u upredenim paricama 0,6 ili 0,8 mm. Takođe se iz formule vidi da otpor provodnika raste sa njegovom dužinom.

Primjer 5.1. Izračunati otpor bakarnog provodnika prečnika 0,6 mm i dužine 1 km.

Rješenje: Površina poprečnog presjeka provodnika je kružnog oblika. Poluprečnik provodnika je polovina prečnika:

$$R = \frac{0,6 \text{ mm}}{2} = 0,3 \text{ mm} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Površina poprečnog presjeka provodnika jeste površina kruga koja se može izračunati po formuli:

$$S = R^2 \pi = (0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 3,14 = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.$$

Otpor provodnika će biti:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{2,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2} = 60 \Omega.$$

Električni otpor u kablovima izaziva **slabljenje signala**. Slabljenje je važna karakteristika fizičkih medijuma. Ono se izražava u decibelima, i to kao **logaritamski odnos** količnika emitovane (P_t) i primljene (P_r) snage signala koji se prenosi:

$$a = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \text{ [dB]}.$$

Primjer 5.2. Izračunati slabljenje provodnog kabla (u dB) ako je, usljed slabljenja, snaga na kraju kabla četiri puta manja.

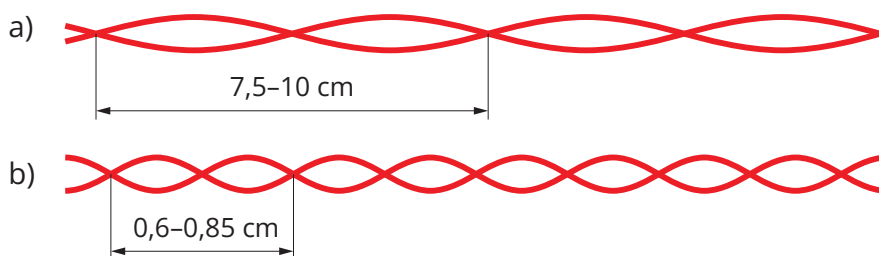
Rješenje:

Iz $a \text{ [dB]} = 10 \log (P_t/P_r)$ i $P_r = P_t/4$, dobijamo da je:

$$a \text{ [dB]} = 10 \log 4 = 6,02 \text{ dB}.$$

Ako je snaga signala na kraju provodnog kabla četiri puta manja od snage signala na ulazu u kabl, to odgovara slabljenju provodnog kabla od približno 6 dB.

Korak upredanja, odnosno rastojanje između navoja uvijanja, takođe je važan faktor koji utiče na kvalitet prenesenog signala. Što je korak manji, broj uvijanja je veći, pa je i interferencija između susjednih parica manja. Na slici 5.2 prikazana je jedna upredena parica različitih koraka upredanja. Očigledno je da parica prikazana u donjem dijelu slike b) ima manji korak upredanja u odnosu na paricu prikazanu u gornjem dijelu a), čime je pogodnija za prenos signala.



Slika 5.2. Koraci upredanja

Kvalitet prenosa metalnim provodnikom zavisi i od učestanosti signala koji se njime prenosi. Naime, signali na višim učestanostima pri prenosu više slabe u odnosu na signale na nižim učestanostima. Glavni organiĉavajući faktori upredenih kablova jesu parazitne kapacitivnosti i pojava koja se zove **skin-efekat**. Porastom učestanosti predajnog signala, struja koja protiče kroz provodnik ima težnju da se raspodijeli po spoljnoj površini, čime se smanjuje presjek žice koji provodi struju. Ovo dovodi do povećanja električne otpornosti na višim učestanostima, a time i do povećanja slabljenja provodnika. Zbog toga je učestanost signala znaĉajan ograniĉavajući faktor pri njegovom prostiranju kroz fiziĉke vodove.

Upredene parice najĉešće se koriste u fiksnoj telefoniji za povezivanje telefonskih terminala sa lokalnom telefonskom centralom, kao i za povezivanje računara na kratkim rastojanjima u lokalnim računarskim mrežama.

Upredene parice razlikuju se i po tome da li imaju zaštitni kablovski omotaĉ, tj. da li postoji omotaĉ oko provodnika koji se upredaju. Parice bez omotaĉa (UTP – engl. **Unshielded Twisted Pair**) najĉešći su medijum za lokalne računarske mreže. Jeftine su i jednostavne za ugradnju. Najveći broj računarskih instalacija po zgradama ožičen je ovakvim paricama. Zbog već navedenih osobina ovih kablova, protok podataka, kao i rastojanja koja se ovom vrstom prenosnog medijuma mogu ostvariti, ograniĉeni su. Na slici 5.3. prikazan je UTP kabl sa mrežnim konektorom RJ45, kojim se kabl završava.



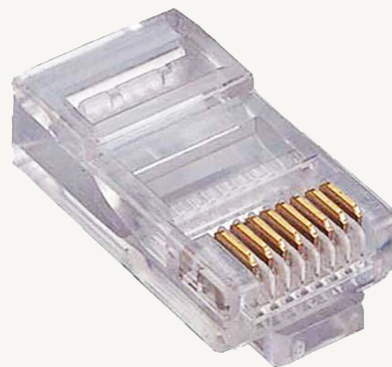
Slika 5.3 UTP mrežni kablovi sa mrežnim konektorima RJ45

PRIMJENA U PRAKSI

RJ45 (engl. **Registered Jack 45**) naziv je za osmopolni utikaĉ koji se koristi za povezivanje računara UTP kablom u računarsku mrežu. Strukturno kabliranje je kablovska infrastruktura u zgradama namijenjena telekomunikacionim servisima.

Postupak povezivanja kablova sa konektorom naziva se i terminiranje kablova. UTP kablovi, koji se najĉešće koriste u računarskim mrežama, sastoje se od osam pojedinaĉno izolovanih bakarnih provodnika koji su upredeni u ĉetiri para (ĉetiri parice) i oznaĉeni razliĉitim bojama. Radi fiziĉke zaštite, ĉetiri parice obuhvaćene su zaštitnim omotaĉem. Kabl se završava konektorom RJ45. Da bi se postavio konektor na kabl, potreban je poseban alat (klijesta) kojim se poslije ubacivanja žica u konektor, prema

određenom rasporedu, pritiskom kliješta na konektor, žice trajno uĉvršćuju. Ovaj postupak naziva se krimpovanje kablova.



Slika 5.4. RJ45 mrežni konektor

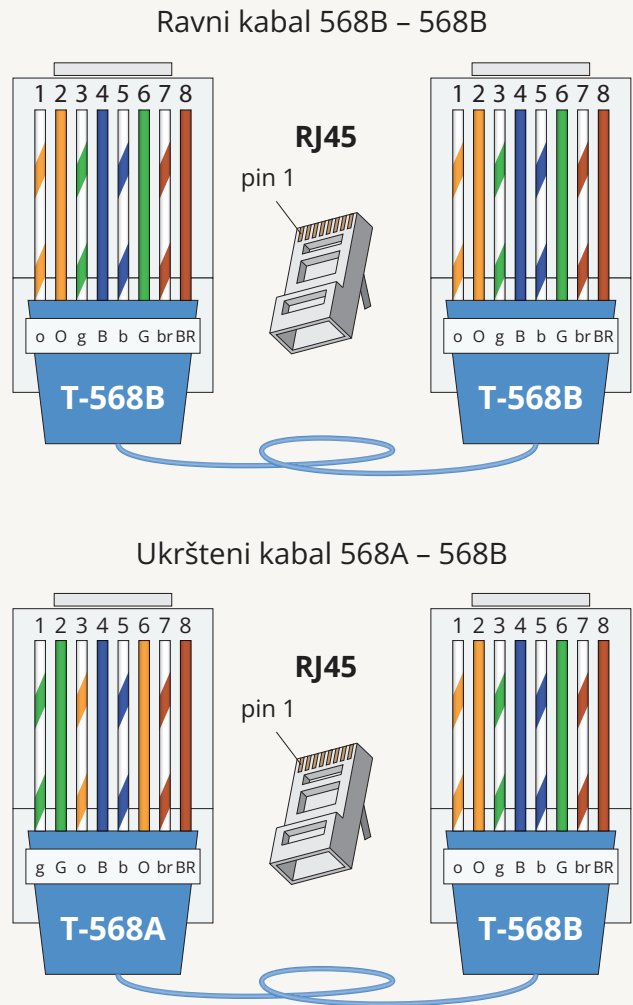
Žice se razlikuju po bojama, po jednom od dva standarda: TIA/EIA 568B ili 568A (tabela 5.2).

Tabela 5.2. Raspored parica za standarde 568A i 568B

Broj iglice	Raspored žica za standard 568B	Raspored žica za standard 568A
1	Bijelo-narandžasta	Bijelo-zelena
2	Narandžasta	Zelena
3	Bijelo-zelena	Bijelo-narandžasta
4	Plava	Plava
5	Bijelo-plava	Bijelo-plava
6	Zelena	Narandžasta
7	Bijelo-braon	Bijelo-braon
8	Braon	Braon

Raspored parica koje se uvlače u konektor određen je načinom povezivanja uređaja. Ako je raspored parica na oba kraja kabla isti, radi se o ravnom kablju (*straight-through cable*) koji se koristi za povezivanje dva uređaja različitog tipa (npr. računara i komunikacionog uređaja). Obrtanjem redoslijeda parica za prijem i slanje signala na različitim krajevima kabla, dobija se ukršteni kabl (*cross-over cable*) koji se koristi za povezivanje uređaja istog tipa (npr. direktno povezivanje dva računara). Na slici 5.5 prikazan je raspored parica za povezivanje računarskih uređaja ravnim i ukrštenim kablom.

Za testiranje UTP kablova koriste se tester UTP kablova (slika 5.6). Pomoću ovog uređaja ispituje se ispravnost svih osam provodnika mrežnog kabla.



Slika 5.5. Raspored parica za ravni i ukršteni kabl



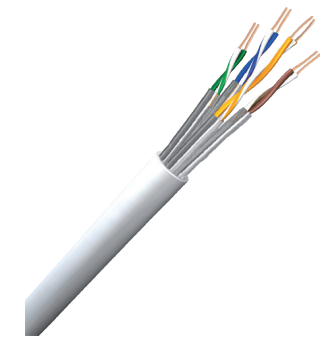
Slika 5.6. Tester UTP kablova

Kablovi realizovani od UTP parica standardizovani su po kategorijama. Ključna razlika između kablova različite kategorije odnosi se na korak upredanja. Više kategorije podrazumijevaju gušće upredanje. Na primjer, UTP kablovi kategorije 5, koji imaju tri do četiri upredanja na 2,5 cm, podržavaju brzinu prenosa od 100 Mb/s za rastojanja do 100 m. Gušćim upredanjem smanjuje se preslušavanje između parica i omogućava kvalitetniji signal na većim razdaljinama, zbog čega su ove parice pogodne za komunikaciju između računara.

Danas se sve češće koriste UTP kablovi kategorija 6 i 7, koji podržavaju brzinu prenosa do 10 Gb/s na rastojanjima do 100 m. U tabeli 5.3 prikazane su kategorije UTP kablova sa oblastima primjene.

Tabela 5.3. Kategorije UTP kabla

Kategorija	Brzina	Primjena
1	1 Mbps	Samo prenos govora. Više se ne koristi.
2	4 Mbps	Telefonija (rijetko se koristi)
3	16 Mbps	Računarske mreže malih brzina prenosa podataka. Rijetko se koriste.
4	20 Mbps	Računarske mreže sa računarima povezanim u krug (prsten). Rijetko se koriste.
5	100 Mbps 1 000 Mbps	Računarske mreže velikih brzina prenosa podataka.
5e	1 000 Mbps	(1 Gigabitni Ethernet) Računarske mreže velikih brzina prenosa podataka.
6,7	10 000 Mbps	(10 Gigabitni Ethernet) Računarske mreže velikih brzina prenosa podataka.



a)



b)

Slika 5.7. STP (a) i FTP (b) kabl

Prva kategorija UTP kabla koristi se kod prenosa govornog signala u telefoniji, i podržava brzinu od 1 Mb/s, dok se kategorija 2 rijetko koristi. Kategorija 3 UTP kabla koristila se kod prvih žičnih lokalnih računarskih mreža, dok se kategorija 4 rijetko koristi. Kategorije od 5 do 7 koriste se u računarskim mrežama, i podržavaju brzine od 100 Mb/s, 1000 Mb/s i 10 000 Mb/s.

Signal koji se prenosi UTP paricama izložen je elektromagnetnoj interferenciji koja potiče od spoljašnjih izvora. Jedan od načina poboljšanja karakteristika UTP parica jeste da se parica obloži metalnim omotačem STP (*shielded twisted pair*) ili folijom FTP (*foiled twisted pair*), pomoću kojih se smanjuju spoljašnji uticaji (slika 5.7).

STP kabl je teži i komplikovaniji za proizvodnju, ali su – usljed postojanja oklopa – otporniji na smetnje i elektromagnetno zračenje nego UTP kablovi. Zbog toga im je i brzina prenosa podataka veća. Na tržištu su dostupni različiti tipovi ovakvih bakarnih kablova. Pogodni su za upotrebu u okruženju u kojem su kablovi izloženi elementima, konstrukcijama i opremi koja može da prouzrokuje smetnje u prenosu podataka. Primjer za to jesu kablovi kojima se telefoni u kućama povezuju sa razvodnim kutijama.

Poseban oblik oklopljenog bakarnog kabla jesu FTP kablovi. Za realizaciju zaštite u FTP kablju koriste se aluminijumske folije debljine 25 mikrona koje se obavijaju oko parica. Folija služi da indukovano elektromagnetno zračenje spovede do uzemljenja. Na taj način zračenje nema uticaj na prenos signala paricom, čime se smanjuje njegovo slabljenje.

Najpoznatije kategorije FTP kabla jesu CAT 5E i 6E. Provodnik CAT 5E ima nešto manji presjek od provodnika CAT6E.

PRIMJENA U PRAKSI

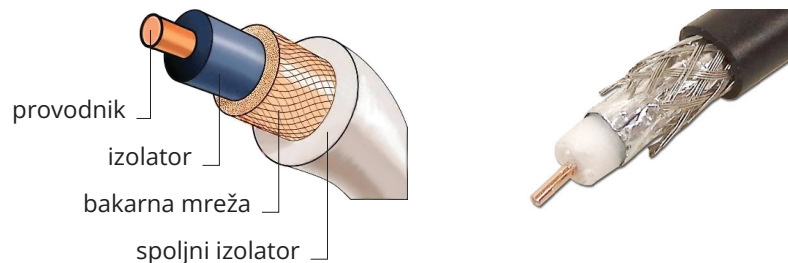
FTP kablovi se često koriste za sisteme video-nadzora bazirane na mrežnim internet-protokolima, kada se smetnje od spoljašnjih izvora žele svesti na

najmanju moguću mjeru. Obično se, zbog slabije savitljivosti, ugrađuju u zidove.

5.1.2. Koaksijalni kabl

Koaksijalni kabl omogućuje veći propusni opseg i bolji kvalitet prenosa nego upredene parice.

Koaksijalni kabl se sastoji od dva provodnika, spoljašnjeg i unutrašnjeg (slika 5.8). Spoljašnji provodnik obuhvata unutrašnji provodnik, koji je izrađen od pune žice. Provodnici su međusobno odvojeni izolatorom. Oko spoljašnjeg provodnika postavlja se zaštitni omotač, koji se izrađuje od nekog izolacionog materijala.



Slika 5.8. Presjek i izgled koaksijalnog kabla

Oba provodnika imaju zajedničku osu, koncentrični su, pa se zbog toga ovaj provodnik i naziva koaksijalni. Po jednom od osnovnih zakona elektrotehnike, električno polje u unutrašnjosti nekog provodnika jednako je nuli. Kako koaksijalni kabl ima spoljašnji provodnik, to su električna polja izazvana spoljnim uticajima unutar njega praktično zanemarljiva. Stoga je koaksijalni kabl – u odnosu na upredenu paricu – znatno otporniji na spoljašnja ometanja, elektromagnetna zračenja, interferenciju i preslušavanje. Zbog toga se njime mogu prenositi i signali znatno viših frekvencija, reda GHz, a samim tim moguće su i veće brzine prenosa, koje prelaze 1 Gb/s. Međutim, zbog zaštitnog omotača i koncentrične konstrukcije, koaksijalni kabl je skuplji i teži za instalaciju nego upredena parica.

Imajući u vidu opseg frekvencija koji može prenijeti, glavna primjena koaksijalnog kabla je u prenosu i raspodjeli video i televizijskog signala. Na primjer, signal sa prijemne TV antene se do televizora vodi koaksijalnim kablom.

PRIMJENA U PRAKSI

Koaksijalni kablovi koriste se u sistemima video-nadzora, TV sistemima i u mjernoj tehnici, za izradu mjerno-ispitnih provodnika (**sonde**). Razlika između koaksijalnih provodnika je u karakterističnoj impedansi. Karakteristična impedansa koaksijalnog kabla

zavisi od dimenzije kabla. Karakteristična impedansa u slučaju veze TV antene sa televizorom jeste 75 Ω , a sonde se prave od koaksijalnog kabla impedanse 50 Ω .

DODATAK +



Slika 5.9. BNC konektor (a) N tipa i (b) T tipa

Koaksijalni kablovi danas su gotovo potpuno potisnuti iz upotrebe u računarskim mrežama. Razlog je u tome što kablovi sa upredenim bakarnim paricama omogućuju mnogo veće brzine prenosa, jeftiniji su i fleksibilniji pri instalaciji. Ranije su se upotrebljavale dvije vrste koaksijalnih kablova za povezivanje računara u računarskim mrežama. RG-58 (*thinwire*), tanki 50-omski kabl, korišćen je za povezivanje manjih grupa računara, i omogućavao je brzinu prenosa do 10 Mb/s na segmentu dužine do 185 m. RG-11 (*thickwire*) nešto je deblji 75-omski kabl, koji je korišćen kao glavni kabl za raspodjelu signala u lokalnim računarskim mrežama u zgradama, između spratova. Omogućavao je maksimalan domet do 500 m pri brzini prenosa od 10 Mb/s. Mrežne kartice računara, koje omogućuju umrežavanje računara, pri ranijim izvedbama morale su imati konektor BNC (**British Naval Connector**) za povezivanje koaksijalnih kablova sa računarima. Ti konektori proizvedeni su u dvije izvedbe – N i T (slika 5.9).

5.1.3. Optičko vlakno

Optičko vlakno je tanka staklena ili plastična nit koja se u telekomunikacijama upotrebljava za prenos signala. Staklo koje se koristi ima veliku čistoću, koja se ne može upoređivati sa običnim staklom.

ZANIMLJIVOST

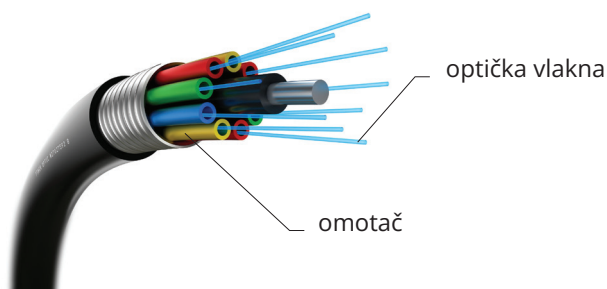
Kada bi, na primjer, bilo moguće od materijala koji se koriste za izradu optičkih vlakana napraviti staklo debljine nekoliko kilometara, takvo staklo bilo bi providno kao obično prozorsko staklo debljine 3–4 mm.

U optičkim telekomunikacijama, prenosni medijum je optičko vlakno (engl. *optical fiber*), a informacija se prenosi putem svjetlosti. Optička vlakna grupišu se u snopove od dva, četiri, osam, pa do 96 vlakana. Vlakna se omotavaju zaštitnim omotačima, koji ih štite od mehaničkih oštećenja. Radi velike preciznosti koja je neophodna pri povezivanju vlakana, za njihovo povezivanje se koristi posebna tehnologija.

Pri korišćenju optičkog vlakna potrebno je električni signal pretvoriti u svjetlosni, ubaciti svjetlost u vlakno; a na drugoj strani, dobijeni svjetlosni signal opet pretvoriti u električni. Ovaj proces obavljaju posebni uređaji – laseri i diode.

Optičko vlakno je kao medijum mnogo pogodnije, pouzdanije i sigurnije od bakarnih provodnika zbog toga što ne prenosi električne, već svjetlosne signale. Zato nema elektromagnetnih smetnji i ometanja signala koji se prenose vlaknom, a samim tim znatno je smanjena vjerovatnoća greške pri prenosu binarnih svjetlosnih signala. Vlaknom se mogu prenositi i signali izuzetno visokih učestanosti, čak i reda veličine THz ($1 \text{ THz} = 1 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$). Zbog toga optička vlakna nude i velike brzine protoka signala koje u teoriji dostižu i do 50 Tb/s.

Optičko vlakno je dugačak, tanak, savitljiv cilindar od stakla koji se sastoji od dva sloja, unutrašnjeg – jezgra (engl. *core*) i spoljašnjeg – omotača (engl. *cladding*). Oko optičkog vlakna postoji zaštitni sloj, čija je svrha da mehanički zaštiti dva prethodna sloja i da omogući njegovo lakše savijanje (slika 5.10).



Slika 5.10. Presjek optičkog kabela

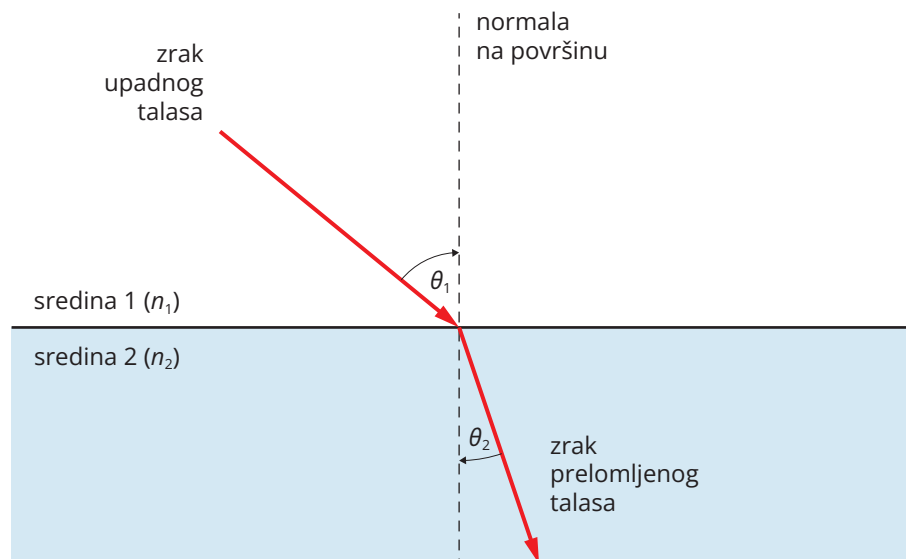
Staklo od koga je načinjeno jezgro ima veći indeks prelamanja nego staklo omotača. Ovo je neophodno radi ostvarivanja potpunog odbijanja svjetlosti, odnosno totalne refleksije svjetlosnog signala, na graničnom sloju između jezgra i omotača.

Osnovna uloga optičkog vlakna jeste da svjetlost, koja se inače u slobodnom prostoru prostire pravolinijski, odvede od predajnika do prijemnika uz što manje gubitke. Zahvaljujući fizičkim zakonima odbijanja i prelamanja svjetlosti, svjetlosni snop ne može da izađe iz vlakna.

Svjetlost je elektromagnetski talas (EMT), pa zakoni koje važe za EMT – važe i za svjetlost. Prolaskom svjetlosti kroz neku sredinu, njena brzina manja je od one u slobodnom prostoru, i određena je fizičkim svojstvima sredine kroz koju putuje. Indeks prelamanja materijala n mjera je usporavanja svjetlosti pri prolasku kroz taj materijal. Definiše se kao odnos koji pokazuje za koliko je puta brzina prostiranja svjetlosti u njemu manja u odnosu na brzinu u vakuumu. Na primjer, u materijalu sa indeksom prelamanja $n = 1,5$, odnosno $n = 3/2$, brzina svjetlosti iznosi tačno $2/3$ brzine svetlosti u vakuumu, približno 200.000 km/s.

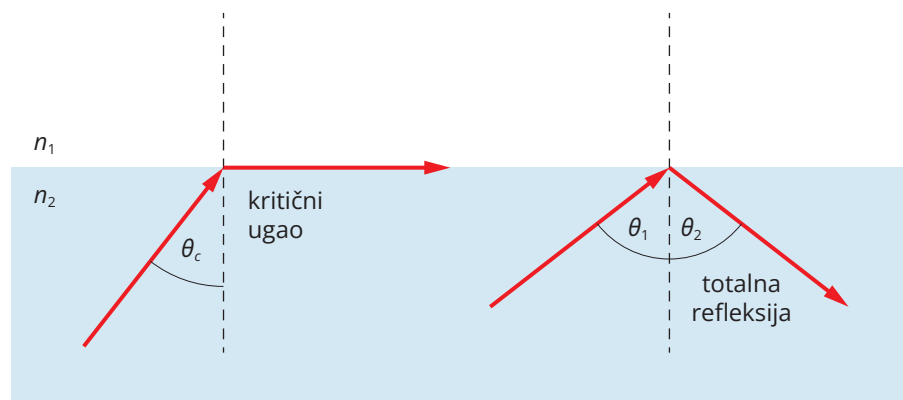
Svjetlost najbrže putuje kroz vakuum, i u njemu je $n = 1$. U svakoj drugoj sredini svjetlost se kreće sporije: što je sredina gušća, brzina joj je manja, a indeks prelamanja veći. Kada svjetlost prelazi iz jedne sredine u drugu, na graničnoj površini – usljed razlike gustina – dolazi do njenog prelamanja. Što je razlika gustina veća, odnosno indeks prelamanja veći, to je prelamanje zraka, odnosno njegovo skretanje, izraženije.

Na slici 5.11 prikazan je prelazak svjetlosnog zraka iz sredine sa indeksom prelamanja n_1 u drugu sredinu sa indeksom prelamanja n_2 .



Slika 5.11. Prelamanje svjetlosnog zraka

Svjetlosni zrak prelama se po Snelijus–Dekartovom zakonu prelamanja: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Ako se na odgovarajući način podesi upadni ugao pod kojim se svjetlosni signal ubacuje u vlakno, kojem odgovara određeni odnos indeksa prelamanja dvije sredine, prelomljeni zrak biće paralelan graničnoj površini (slika 5.12).



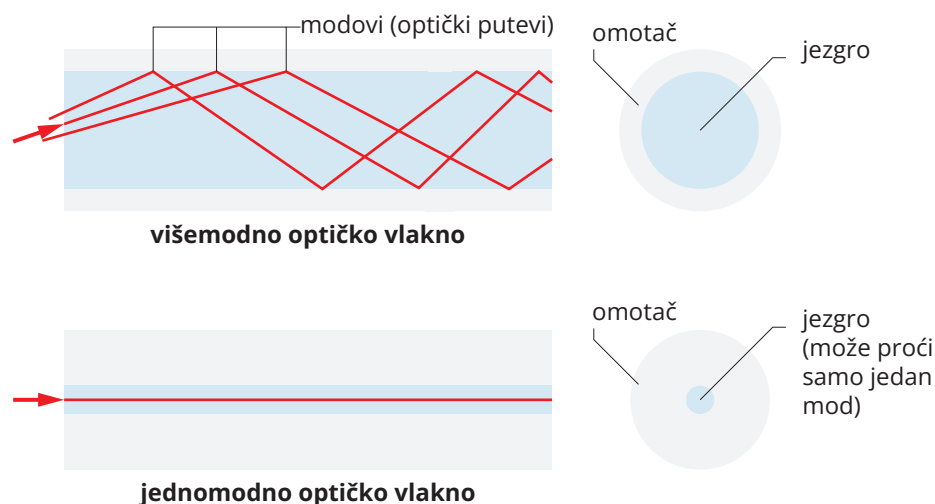
Slika 5.12. Totalna refleksija svjetlosnog zraka

Upadni ugao naziva se kritični ugao (θ_c), i on se mjeri u odnosu na normalu na graničnu površinu. Ako se ugao dalje povećava, sva upadna svjetlost reflektuje se nazad, u istu sredinu. Dakle, za zrake koji upadaju pod uglom većim od kritičnog dobija se samo jedan odbijeni zrak koji potpuno odgovara upadnom. Taj zrak ne može nikako izaći iz jezgra vlakna, pošto se isti ugao ponavlja pri svakom sudaru sa graničnom površinom. Ta se pojava naziva **totalna refleksija**.

Totalna refleksija je fizička pojava na kojoj se zasniva prenos svjetlosti kroz optičko vlakno. Već smo rekli da se optičko vlakno sastoji od jezgra i omotača. Jezgro ima veći indeks prelamanja svjetlosti od omotača. Svjetlost se prostire kroz jezgro optičkog vlakna tako što se početni kraj vlakna osvjetli u pravcu njegove ose, te svjetlost nastavlja da se prostire duž optičkog vlakna. Zahvaljujući pojavi totalne refleksije, svjetlosni zrak (koji se prostire isključivo pravolinijski) može da se prostire i kroz blago zakrivljeno optičko vlakno. Zakrivljenje mora biti u propisanim granicama kako bi se svjetlosni zrak, koji pogodi omotač, totalno reflektovao od njega i vratio nazad u jezgro. Na taj način nastavlja svoje kretanje kroz vlakno, sve do njegovog kraja.

Prostiranje svjetlosnog signala kroz optičko vlakno zavisi od veličine, konstrukcije i materijala od kojeg je vlakno izgrađeno, kao i od prirode svjetlosnog signala emitovanog u vlakno. Putanje kojima se prostiru svjetlosni zraci istih karakteristika i istog upadnog ugla nazivaju se **modovi**. U odnosu na način prostiranja svjetlosti duž vlakna, razlikuju se **monomodna** (jednomodna) i **multimodna** (višemodna) vlakna.

Kod monomodnih vlakana postoji samo jedna putanja prostiranja svjetlosti duž jezgra. Prečnik monomodnih vlakana je oko 10 mikrona (10^{-6} m). Multimodna vlakna imaju veći prečnik jezgra, najčešće oko 50 mikrona, i kroz njih je i veći broj mogućih putanja prostiranja svjetlosnog snopa, koji se obično dobijaju odbijanjem od granične površine između jezgra i omotača. Na slici 5.13 prikazani su optički putevi modova kroz oba tipa optičkog vlakna.



Slika 5.13. Putevi modova kroz optička vlakna

Optički kablovi sa monomodnim vlaknima najčešće se koriste u savremenim optičkim telekomunikacijama.

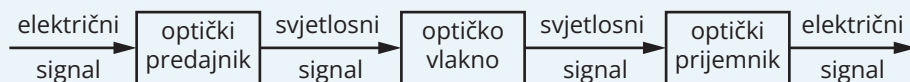
DODATAK +

Solitoni

Vlakna sa većim prečnikom jezgra omogućuju zraku svjetlosti kretanje različitim putanjama unutar jezgra. Rekli smo da se takav način prostiranja svjetlosti kroz vlakno naziva multimodni prenos. Kod ovakvog načina propagacije signala, zbog različitih putanja koje pređu, svjetlosni signali stižu na kraj vlakna u različitim trenucima. Ova pojava dovodi do rasipanja (disperzije) signala na mjestu prijema. Disperzija prouzrokuje dodatno slabljenje signala. Međutim, ako se kroz vlakno šalju impulsi specifičnog profila, koji se nazivaju **solitoni**, skoro se poništavaju svi disperzioni efekti, tako da je moguće slati impulse hiljadama kilometara bez primjetnog izobličenja.

Monomodno vlakno ima mali prečnik jezgra, reda veličine talasne dužine svjetlosnog snopa koji se u njega ubacuje. Toliko malim prečnikom jezgra svjetlost se prenosi s jednog kraja vlakna na drugi putem samo jednog zraka. Na taj se način znatno smanjuje mogućnost disperzije signala i omogućuju brzine prenosa reda veličine 10 Gb/s. Tipične dimenzije monomodnih vlakana su 5-12 μm za jezgro i 125 μm za omotač.

Prenos signala preko optičkih kablova zahtijeva optoelektronske pretvarače, koji električni signal pretvaraju u svjetlosni (na predajnom dijelu kabla), i detektore koji dobijene svjetlosne signale pretvaraju u odgovarajuće električne (na prijemnom dijelu kabla). Dakle, sistem prenosa sa optičkim kablovima ima tri funkcionalna dijela: predajnik – izvor svjetlosti, optičko vlakno i prijemnik – fotosenzor (slika 5.14). Standardni električni signal, nosilac informacije, dovodi se na optički predajnik u kojem se konvertuje u svjetlosni signal, zatim se svjetlost ubacuje u optičko vlakno, na čijem je drugom kraju prijemnik, u kojem se svjetlosni signal pretvara u električni.



Slika 5.14. Sistem prenosa sa optičkim kablovima

Kao optički predajnici koriste se različiti tipovi svjetlosnog izvora koji moraju ispuniti sljedeće zahtjeve: (1) emitovana svjetlost mora se nalaziti u opsegu učestanosti u kojoj je vlakno malo apsorbira (malo slabljenje) i u kojoj je rasipanje svjetlosnog zraka (disperzija) što manje, (2) snaga zračenja uvedena u optičko vlakno mora biti što veća i svjetlosni snop mora biti dobro usmjeren i (3) spektar zračenja svjetlosti koja se ubacuje u vlakno mora biti što je moguće uža, što je naročito važno za velike brzine prenosa.

Dioda je elektronska komponenta koja, u zavisnosti od smjera napona na koji se priključi, dozvoljava ili ne dozvoljava protok struje. Smjer u kojem se struja propušta naziva se provodni, a smjer u kojem ne propušta – neprovodni smjer diode.

Svjetlosna dioda, koja se naziva i LED (*light emitting diode*) poluprovodnička je dioda koja emituje svetlost kada kroz nju prolazi struja. Jačina emitovanja svjetlosti proporcionalna je jačini struje koja se propušta kroz diodu. LED je jednostavniji za izradu, jeftiniji je, ali za razliku od laserske diode ima širi spektar zračenja. Ovo ima za posledicu manju sposobnost usmjeravanja zraka LED diodom, kao i veće rasipanje i gubitke pri uvođenju svjetlosti u vlakno. Zbog male usmjerenosti zračenja, LED se ne može koristiti kao izvor u sistemima gdje je prenosni medijum monomodno vlakno (koje ima mali prečnik), već se koristi samo kao izvor za multimodna vlakna (sa znatno većim dimenzijama prečnika).

Laser (engl. *light amplification by stimulated emission of radiation*) naziv je za optički uređaj koji emituje koherentni snop nosilaca svjetlosti – fotona. Snop je koherentan, što znači da su EMT koje laser emituje međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru. Za razliku od svjetlosti koju emituju uobičajeni izvori, kao što su npr. sijalice, laserska svjetlost uvijek je iste talasne dužine, tj. monohromatska, i usmjerena je u uskom snopu. LED diode i laseri koriste se za pretvaranje električnih signala u svjetlosne signale, koji sadrže poruke koje se prenose optičkim kablom.

I **laserske diode** rade na principu zračenja svjetlosti koja nastaje usljed dovođenja pobudne struje. Laserska dioda radi na principu stimulisane emisije, što omogućuje pojačavanje ulaznog signala i na izlazu dobijanje signala znatno užeg spektra zračenja. Na primjer, kod laserskih dioda izlazna snaga signala je oko 10 mW, dok su mu talasne dužine reda veličine nanometra. Zbog uskog snopa zračenja, primjena laserskih dioda uobičajena je kod optičkih sistema sa monomodnim kablovima.

Laserske diode koriste se kada je potrebna velika brzina prenosa i/ili veliki domet.

Na drugom kraju optičkog vlakna, suprotnom od svjetlosnog izvora, nalazi se optički prijemnik – **fotodetektor**. Fotodetektor je optoelektronski elemenat koji energiju svjetlosnog signala pretvara u električnu struju. Zadatak fotodetektora je da obavi inverzan proces koji se vrši u optičkom predajniku, tj. da svjetlosni signal iz vlakna pretvori u električni. Zahvaljujući svojim osobinama, kao što su osjetljivost, širok propusni opseg i brz odziv na pobudu, u optičkim telekomunikacijama kao fotodetektor se koriste **photodiode**. Fotodiode je poluprovodnički elemenat koji, kada se izloži svjetlosnom zraku, generiše električni signal. Kada dioda nije osvijetljena, na njenom izlazu nema struje. Kada se osvijetli, nosioci svjetlosti – fotoni izbijaju elektrone iz atoma diode, čije kretanje izaziva pojavu električne struje – fotostruje.

Važni parametri fotodiode jesu velika osjetljivost, velika brzina odziva i širok propusni opseg. Osjetljivost je sposobnost diode da detektuje slabu svjetlost. Vrijeme odziva je vrijeme koje protekne od trenutka kada je dioda pogođena snopom svjetlosti do trenutka kada generiše električni signal. To vrijeme je posebno značajno u optičkim telekomunikacijama, jer dioda mora generisati odgovarajuću struju odmah po prijemu kratkih svjetlosnih impulsa. Vrijeme odziva povezano je sa brzinom protoka podataka kroz optičko vlakno. Na primjer, ako je vrijeme odziva fotodiode reda veličine deseti dio nanosekunde, to za posljedicu ima ograničenje brzine protoka kroz optičko vlakno na oko 10 Gb/s.

Snaga svjetlosnog signala u optičkom vlaknu opada sa povećanjem udaljenosti od izvora svjetlosti. Opadanje snage predstavlja slabljenje signala, i obično se izražava u dB/km. Slabljenje je važan parametar, jer određuje najveću dužinu kabla između optičkog predajnika i prijemnika, koju je moguće koristiti da bi se signal, bez upotrebe pojačavača, mogao prenijeti. Svjetlosni signal slabi kroz vlakno usljed apsorpcije, rasipanja i zračenja svjetlosti. Uzrok apsorpcije i rasipanja jesu nečistoće u vlaknu i mikroskopske razlike u gustini materijala od kojih je vlakno napravljeno. Kada foton naleti na nečistoću ili na nehomogenost, on će se raspršiti ili apsorbirati. Zračenje svjetlosti najviše se ispoljava zbog savijanja optičkog vlakna. Kada naiđe na savijeni dio vlakna, dio svjetlosnog snopa koji putuje jezgrom vlakna može da ne bude totalno reflektovan natrag u jezgro, već da pobjegne u omotač.

Laserska komunikacija u svemiru predstavlja ostvarivanje komunikacije u slobodnom prostoru korišćenjem lasera. Komunikacija može biti u potpunosti u svemiru (međusatelitska laserska veza) ili između stanica na Zemlji i satelita (komunikacija Zemlja–satelit ili satelit–Zemlja). Glavna prednost korištenja laserske komunikacije u odnosu na radio-talase jeste povećana širina opsega,

koja omogućava prenos više podataka za kraće vrijeme. Komunikacijski domet laserske komunikacije u slobodnom prostoru trenutno je reda veličine nekoliko hiljada kilometara. Predviđa se da će dalji razvoj ove tehnologije, uz korišćenje optičkih teleskopa, omogućiti komunikacije na međuplanetarnim udaljenostima reda veličine desetina miliona kilometara.

Slabljenje multimodnog vlakna veće je od slabljenja monomodnog vlakna zato što se pri savijanju kabla, zbog većeg broja modova, jedan dio njih totalno ne reflektuje, već se probije kroz omotač vlakna. Podužno slabljenje (slabljenje po jedinici dužine) monomodnog vlakna je 0,3–1 dB/km, dok se slabljenje kod multimodnih vlakana kreće 5–10 dB/km. Podužno slabljenje kabla (a_p) računa se kao količnik slabljenja kabla a (dB) i dužine kabla l (km), pa se mjeri u dB/km. Slabljenje optičkog kabla a dobija se tako što se *podužno* slabljenje kabla pomnoži sa dužinom kabla: $a = a_p \cdot l$ i izražava se u dB.

Primjer 5.3. Izračunati slabljenje monomodnog vlakna dužine $l = 10$ km ako mu je podužno slabljenje $a_p = 0,3$ dB/km. Koliko će puta oslabiti signal na ulazu u vlakno?

Rješenje:

Traženo slabljenje će biti:

$$a \text{ [dB]} = a_p \cdot l = \frac{0,3 \text{ dB}}{\text{km}} \cdot 10 \text{ km} = 3 \text{ dB}.$$

Da bi se dobilo slabljenje signala bez dimenzija, mora se početi od definicije slabljenja kabla (u dB):

$$a \text{ [dB]} = 10 \log(a),$$

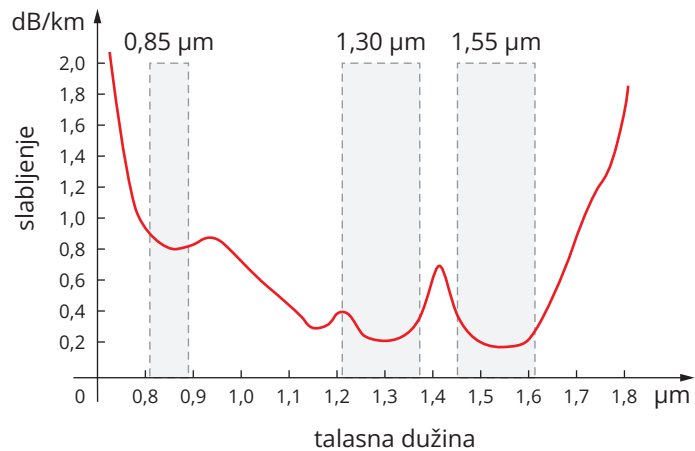
gdje se matematičkim pravilima stepena i logaritma dobije izraz za slabljenje a :

$$a = 10^{\frac{a \text{ [dB]}}{10}} = 10^{\frac{3 \text{ dB}}{10}} = 10^{0,3} = 1,99526 \approx 2,$$

što znači da slabljenju signala od 3 dB odgovara slabljenje od približno dva puta. ■

Slabljenje vlakna zavisi od talasne dužine signala koji se prenose. Optički komunikacioni sistemi u radu koriste tri opsega talasnih dužina na kojima je slabljenje najmanje; oni se nazivaju **optički prozori**. Grupisani su oko talasnih dužina 0,85; 1,30 ili 1,55 μm . Sva tri prozora su širine od 25 do 30 THz.

Na slici 5.15 prikazano je slabljenje svjetlosti pri prolasku kroz vlakno, u zavisnosti od talasne dužine svjetlosti koja se koristi u praksi.

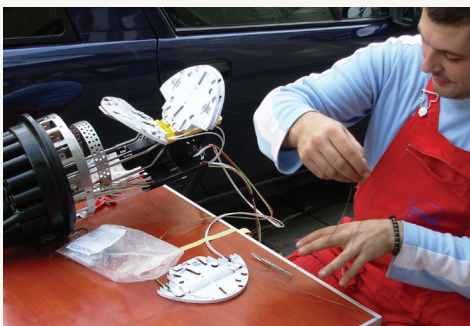


Slika 5.15. Slabljenje svjetlosti kroz vlakno u zavisnosti od njene talasne dužine

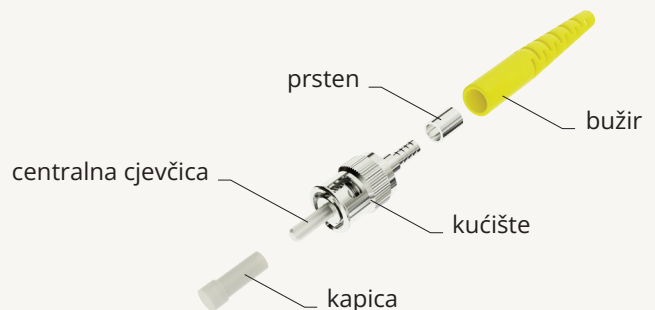
Sa slike se vidi da je slabljenje najveće u okviru prvog prozora. Zbog toga se u savremenim optičkim telekomunikacijama uglavnom koriste drugi i treći prozor.

PRIMJENA U PRAKSI

Spajanje i terminiranje optičkih vlakana. Fabrička dužina optičkog kabla je oko 2100 m. Zbog toga se optičke dionice moraju spajati kako bi se nastavljale jedna na drugu. Postupak spajanja naziva se i splajsovanje, a sastoji se u zavarivanju staklenih vlakana. Postupak se izvodi pod mikroskopom, pri čemu se za zavarivanje koristi električna energija. Pri tome je potrebno obezbijediti veliku čistoću pri radu.



Proces terminiranja (asembliranja) optičkih vlakana se, kao i bakarnih, vrši pomoću konektora. Konektorima se obezbjeđuje veza između optičkih vlakana jednog kabla i komunikacione opreme. Na slici su prikazani djelovi optičkog konektora.

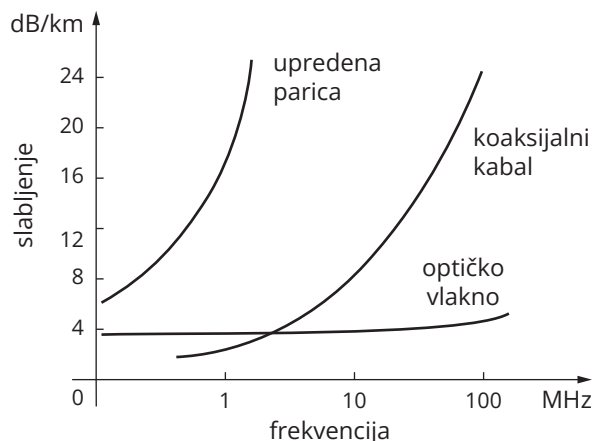


Centralna cjevčica daje čvrstinu optičkom vlaknu i omogućava kontakt sa drugim optičkim vlaknom. Prečnik joj je nešto veći od 125 µm i uglavnom se proizvodi od nerđajućeg čelika ili keramike, što joj obezbjeđuje bolje temperaturne osobine. Kapica ima ulogu da štiti cjevčicu od prašine i mehaničkih oštećenja kada nije u upotrebi. Prsten je veza kućišta i kabla. Bužir se koristi radi smanjivanja savijanja kabla pri njegovom kraju, jer to savijanje može biti uzrok nastanka slabljenja u kablu.

Konektori se razlikuju po bojama. Bež označava multimodni kabl a plava monomodni. Multimodni konektori i njihovi bužiri mogu biti crni ili crveni.

5.1.4. Uporedne karakteristike optičkih vlakana i bakarne žice

Optička vlakna imaju brojne prednosti u odnosu na druge provodne medijume. Prvo, i najvažnije – obezbjeđuju mnogo veći propusni opseg i brzine prenosa u odnosu na bakarne provodnike. Propusni opseg za optičke kablove je reda veličine THz, dok je za bakarne kablove manji od 10 GHz. Optičkim kablovima mogu se ostvariti protoci reda 50 Tb/s, dok za bakarne parice gornja granica za sada iznosi oko 10 Gb/s. Drugo, optička vlakna nisu osjetljiva na spoljašnji uticaj elektromagnetnih zračenja ili atmosferskih pražnjenja. Zbog toga su otporna na interferenciju i preslušavanja, koji su česta pojava kod upredenih parica i koaksijalnih kablova, i ne emituju u okolinu smetnje kao drugi kablovi. Dalje, zbog ovih osobina otpornija su na ometanje i prislušivanje, što je značajna prednost u vezi sa bezbjednošću prenosa informacija. To znači da se kod optičkih vlakana vrlo rijetko pojavi greška u prenosu podataka. Treće, optička vlakna imaju manje slabljenje. Uporedni prikaz slabljenja optičkih i bakarnih kablova prikazan je na slici 5.16. Sa slike se može uočiti da je slabljenje optičkih vlakana konstantno u opsegu do 100 MHz, dok se kod bakarnih provodnika, sa povećanjem frekvencije signala, slabljenje u kابلu eksponencijalno povećava.



Slika 5.16. Uporedni prikaz slabljenja optičkih i bakarnih kablova

Budući da kod optičkih kablova slabljenje sporije raste sa rastojanjem nego u slučaju prenosa električnim provodnicima, optičkim kablovima ostvaruju se komunikacije na većim rastojanjima bez upotrebe pojačavača. I na kraju, optički kablovi su tanji, lakši i u odnosu na bakarne kablove, i otporniji su na koroziju i vlagu. Tipično, optički kablovi imaju deset puta manju težinu od koaksijalnih kablova, tanji su i lakši za ugradnju.

Optička vlakna imaju i nedostataka u odnosu na bakarne kablove. To se u prvom redu odnosi na njihovu manju otpornost na mehanička oštećenja i na savijanje, kao i na skuplje održavanje – montažu i umjeravanje.

ZANIMLJIVOST

Pored primjene u telekomunikacijama, optička vlakna imaju primjenu i u industriji zabave – za pravljenje raznih svjetlosnih efekata. Jedan od njih prikazan je na slici niže.



Istorijski razvoj optičkih vlakana

Primjena optičkih komunikacija intenzivno se razvija od 1980. godine. Postoje i brojni primjeri iz ranije prošlosti koji se po sadašnjim kriterijumima ne mogu svrstati u optičke komunikacije. Tada su se koristili postupci za prenos poruka koje su bile vidljive korisnicima – signalizacija, zastavice, semafori, svjetionici, razni optički sistemi kao što je francuski telegrafski sistem (koji je za 15 minuta prenosio poruku na udaljenost od 200 km) i slično.

Primjenu optike u današnjem smislu pokrenuo je pronalazak lasera 1958. godine, poluprovodničkog lasera 1963. godine i, nakon nekoliko godina, prvih optičkih vlakana.

Relacije kojima je opisano kretanje svjetlosti unutar ravne staklene ploče izveo je 1820. godine francuski fizičar Frenel. Optičko vlakno napravljeno 1962. godine imalo je slabljenje 1000 dB/km. Četiri godine kasnije, fizičari Čarls Kao i Džordž Hokman utvrdili su da veliki gubici u optičkom vlaknu nastaju zbog malih nečistoća unutar stakla, a ne usljed unutrašnjih ograničenja samoga stakla. Procijenili su da se slabljenje svjetlosti koja putuje vlaknom može drastično smanjiti, sa 1000 dB/km na manje od 20 dB/km.

Zahvaljujući otkriću Č. Koa i G. Hokmana, 1970. godine – kada je tim stručnjaka iz kompanije „Corning Glass“ proizveo optičko vlakno dužine stotinu metara – počeo je vrlo intenzivan razvoj optičkih komunikacija. Godine 1976. započela je eksperimentalna primjena optičkih vlakana u telefonskim sistemima Atlante i Čikaga, a 1984. godine pušteno je u rad optičko vlakno kompanije AT&T koje je povezivalo Boston i Vašington. Godine 1988. postavljen je prvi optički kabl ispod Atlantskog okeana.

Tokom 80-ih godina XX vijeka usavršene su tehnologije u vezi sa popravkom prekinutih optičkih kablova i njihovim postavljanjem. Godine 1991. prikazani su optički pojačavači koji su ugrađeni u same optičke kablove, a koji su u stanju da obezbijede 100 puta veći kapacitet od sistema sa elektronskim pojačavačima. Godine 1996. postavljeni su kablovi sastavljeni isključivo od optičkih vlakana i ispod Tihog okeana.

(Izvor: www.automatika.rs/baza-znanja/obrada-signala/fiber-opticki-kabl-i-opticko-vlakno-osnove-i-istorijat.html)

5.2. Bežični medijumi za prenos signala

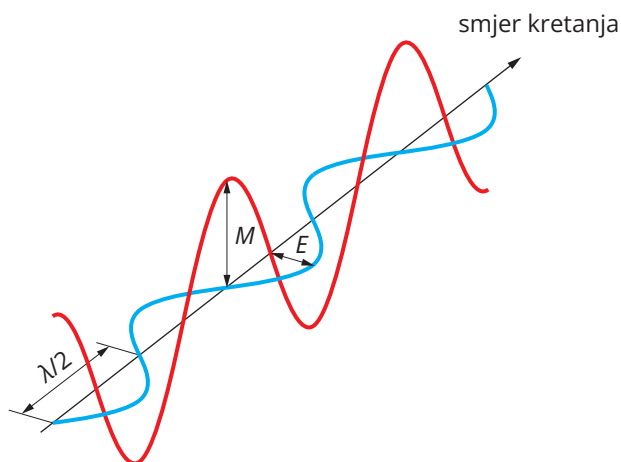
Mobilne veze ostvaruju se iz pokreta. Velika mobilnost ljudi u savremenom svijetu iziskuje potrebu za njihovim povezivanjem bežičnim sistemima komunikacije. Bežični sistemi kao medijum povezivanja koriste vazduh, kojim se prenose elektromagnetni talasi (EMT).

Električna struja je usmjereno kretanje elektrona kroz provodnik. U tačkama prostora oko elektrona uvijek postoji električno polje; a ako se elektron kreće ubrzano, onda postoji još i magnetno polje. Na taj način elektroni koji se ubrzano kreću predstavljaju izvor elektromagnetskog talasa. Dakle, ako kroz provodnik teče električna struja promjenljivog intenziteta, onda se dio njene energije zrači u okolni prostor u vidu elektromagnetnih talasa. Provodnik u ovom slučaju predstavlja predajnu antenu, a prenos između predajnika i prijemnika koji nijesu fizički povezani, predstavlja prenos slobodnim prostorom.

5.2.1. Elektromagnetni talas

Elektromagnetni talas je fizička pojava koja se ispoljava prostiranjem električnih i magnetnih oscilacija kroz slobodan prostor.

Elektromagnetni talas predstavlja oblik energije koji emituje predajni uređaj (antena), a koji u sebi sadrži komponentu električnog i komponentu magnetnog polja. Antena je pretvarač električne energije predajnika u elektromagnetni talas, koji se prostire prema prijemniku u vidu elektromagnetnog zračenja.



Slika 5.17. Komponente električnog (E) i magnetnog (M) polja EMT

EMT, koji emituje predajna antena, širi se u prostoru u vidu sfere. Svaki dio sfere normalan je na pravac prostiranja EMT. Elektromagnetno zračenje predajne antene predstavlja kombinaciju oscilujućeg električnog i magnetnog polja, koji zajedno putuju kroz prostor u vidu talasa. Pri tome, promjene električnog polja uzrokuju promjenu magnetnog, i obrnuto. Elektromagnetni talas se širi u okolni prostor konačnom brzinom koja je u vakuumu jednaka brzini svjetlosti. Na slici 5.17 prikazane su komponente električnog i magnetnog polja EMT.

Da bi prijemna antena apsorbirala što veću energiju dobijenu od predajne antene, neophodno je da bude postavljena u **ravni polarizacije** – paralelno sa linijama električnog polja. Prijemna antena pretvara elektromagnetni talas u električnu energiju.

Prenos i prijem signala u formi EMT dio je rada bežičnih sistema. Da bi se razumjelo kako ovi sistemi funkcionišu, moraju se razumjeti osnove teorije prenosa EMT.

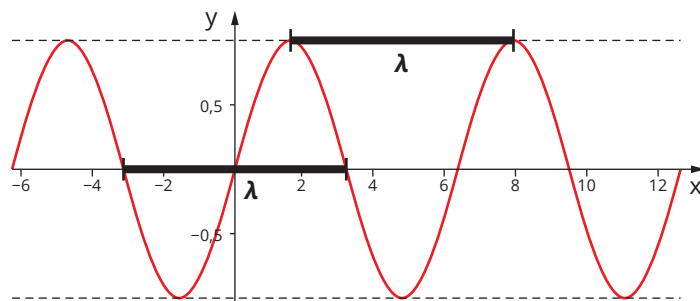
Talas je periodična oscilacija koja se u nekom vremenskom periodu širi kroz prostor.

PRIMJER U PRAKSI

Morski talasi ne pomjeraju predmete u svom smjeru kretanja, već ih samo pomjeraju naviše i naniže. Dakle, čestice vode, koje čine talas, samo osciluju oko svojih ravnotežnih položaja. Kod EMT osciluju električno i magnetno polje.

Najvažnije karakteristike EMT jesu talasna dužina, frekvencija, brzina prostiranja i polarizacija.

Talasna dužina (λ) jeste rastojanje koje talas pređe u jednoj oscilaciji, izraženo u metrima (slika 5.18). Kaže se da je talasna dužina najmanja udaljenost dvije tačke iste faze pokreta jednog talasa. Učestanost ili frekvencija (f) predstavlja broj oscilacija talasa u sekundi, i izražava se u hercima [Hz]. Herc je jedna oscilacija u sekundi.



Slika 5.18. Talasna dužina

Elektromagnetski talasi mogu se prostirati kroz vazduh i kroz vakuum. U vakuumu se elektromagnetski talasi prostiru brzinom koja ne zavisi od učestanosti, brzinom svjetlosti:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

Između talasne dužine i frekvencije elektromagnetnih talasa postoji direktna zavisnost. Talasna dužina elektromagnetnih talasa pri njihovom prostiranju kroz neku sredinu računa se po formuli:

$$\lambda \cdot f = c \tag{5.1.}$$

Primjer 5.4. Izračunati talasnu dužinu EMT učestanosti 3 MHz.

Rješenje:

Iz formule $\lambda \cdot f = c$ dobijamo da je $\lambda = c/f$, pa je:

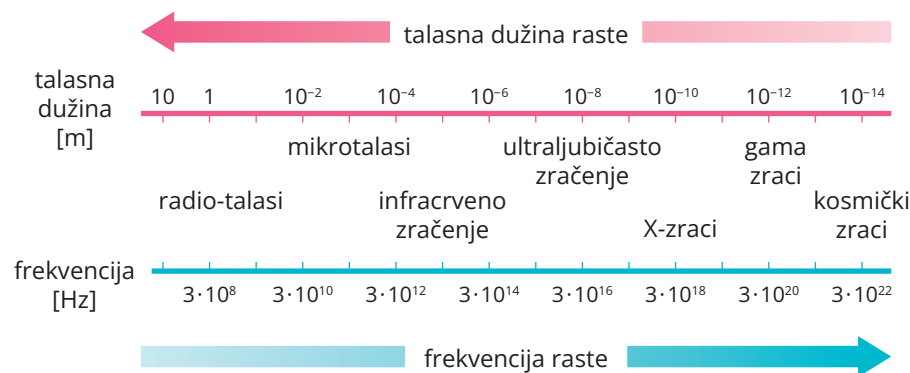
$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 100 \text{ m.}$$

Pri prostiranju EMT vektor jačine električnog polja osciluje u različitim ravnima. Ako osciluje samo u jednoj ravni, onda se takav talas naziva ravanski polarizovani EMT. Polarizacija EMT može biti: horizontalna (vektor električnog polja paralelan je sa površinom zemlje), vertikalna (vektor električnog polja je normalan na površinu zemlje) i kružna (vektor električnog polja mijenja se u vremenu).

Na prostiranje elektromagnetnih talasa utiče više činilaca, od kojih su najznačajniji frekvencija (talasna dužina), Zemljina atmosfera i zakrivljenost Zemlje.

5.2.2. Elektromagnetni spektar

Opseg učestanosti (talasnih dužina) elektromagnetnog zračenja čini elektromagnetni spektar, prikazan na slici 5.19.



Slika 5.19. Elektromagnetni spektar

Informacije se prenose bežičnim putem, u opsezima koje ćemo ukratko opisati.

Radio-prenos počinje talasnim dužinama opsega niskih učestanosti (LF – *low frequency*), od 30 do 300 kHz, koje su namijenjene za prenos signala velikog dometa prostiranjem površinskog talasa. Prenos u ovom opsegu učestanosti koriste podmornice, jer se ovi talasi prostiru i kroz vodu. Prenos je jako osjetljiv na pojavu atmosferskog šuma.

Na srednjetalasnom (MF – *medium frequency*), od 300 do 3000 kHz, i kratkotalasnom području (HF – *high frequency*) od 3 do 30 MHz takođe se ostvaruju komunikacije velikog dometa. Ovi opsezi obično su namijenjeni

za radio-navigaciju, pomorske mobilne komunikacije i za neke vrste radio-difuzije. Signali se prostiru u formi površinskog i jonosferskog talasa. Veze ostvarene na ovim frekvencijama osjetljive su na pojavu atmosferskog šuma i na smjenu dana i noći.

Područje vrlo visokih učestanosti (VHF – *very high frequency*), od 30 do 300 MHz, namijenjeno je za radio-komunikacije profesionalnih službi (vojska, policija), za radio-difuziju i prenos analognog TV signala. Pri prostiranju, veće prepreke (brda i planine) mogu znatno oslabiti signal.

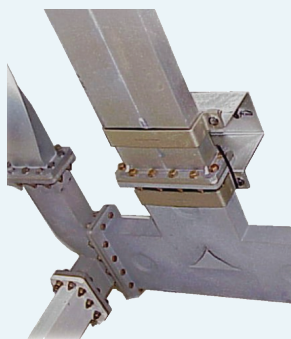
Tipični servisi koji se vežu za opseg ultravisokih učestanosti (UHF – *ultra-high frequency*), od 300 do 3000 MHz, jesu: difuzija televizijskog signala, analognog i digitalnog, sistemi za radio-komunikaciju profesionalnih službi, sistemi mobilne telefonije, satelitski komunikacioni sistemi, uključujući i sisteme za određivanje lokacije pomoću satelita (GPS). Na ovim učestanstima, pojedinim servisima omogućen je veći protok podataka. Domet veza ograničen je optičkom vidljivošću, i efekti zaklanjanja (brda, zgrade, drveće) snažno dolaze do izražaja.

Na supervisokim učestanstima (SHF – *superhigh frequency*), od 3 do 30 GHz, ostvaruju se usmjerene mikrotalasne veze. Na njima rade satelitske komunikacije i radari, ali se na njima ostvaruju i fiksne kopnene veze tipa tačka-tačka, protoka do 155 Mb/s.

Mikrotalasi su dio elektromagnetnog spektra koji se prostire između radio-talasa i infracrvenog zračenja. Nalaze se u oblasti talasnih dužina od 0,001 m do 0,3 m. Mikrotalasi se koriste u mobilnoj telefoniji, komunikacionim satelitima i radarskoj tehnologiji. Oni su glavni prenosioci telefonskih i televizijskih signala, a koriste se i za prenos podataka između stanica na zemlji i između Zemlje i satelita.

Radarski zraci su kratki impulsi mikrotalasa koji se koriste za lociranje aviona i brodova, praćenje klimatskih sistema i određivanje brzine pokretnih objekata.

DODATAK +



Slika 5.20. Primjer talasovoda

Talaso vodi

Talaso vodi su medijumi koji uz minimalan gubitak energije provode elektromagnetne talase u jednom smjeru. Najčešće se realizuju kao šuplje provodne metalne cijevi ili trake (slika 5.20). Geometrija talasovoda definiše njegovu funkciju. Tako, na primjer, svaki talasovod ima sopstvenu talasnu dužinu, koju određuje geometrija i veličina talasovoda, i koja ograničava dužinu talasa koju talasovod može prenijeti.

Na prostiranje talasa utiču prepreke, koje najčešće dovode do prekida veze, kao i slabljenje usljed kiše, snijega i magle.

Buduće satelitske veze, mreže mobilne telefonije pete generacije (5G), kao i širokopolasni kanal u okviru fiksnih bežičnih pristupnih mreža, planirani su za rad na ekstremno visokim učestanostima (EHF – *extremely high frequency*), od 30 do 300 GHz, koji je veoma blizak infracrvenom. Na ovim učestanostima mogu se ostvarivati veze na kratkim rastojanjima koje zahtijevaju izuzetno široke kanale. Prenos je jako osjetljiv, prekid ovih veza prouzrokuju prepreke i atmosferske apsorpcije.

Opsezi prema još višim učestanostima koriste se za optičke komunikacije kao i za bežični prenos – infracrveni (IR). Najzastupljeniji je IrDA prenos podataka koji koristi infracrvenu svjetlost talasne dužine u opsegu 850–900 nm.

Radio-frekvencije su veoma važan i ograničen prirodan resurs. Broj frekvencija je konačan i ograničen: kada ne bi postojalo adekvatno planiranje, upravljanje i koordinacija, signali različitih korisnika međusobno bi se ometali, dolazilo bi do preklapanja signala i zagušenja u radio-komunikacionom saobraćaju. Drugim riječima, radio-frekvencijski spektar postao bi neupotrebljiv za komunikaciju. Zbog toga države vrše regulaciju i upravljanje spektrom. Glavni cilj regulacije jeste optimalna podjela spektra prema namjeni i korisnicima kako bi se ostvarila korist za čitavo društvo.

DODATAK +

Optička vidljivost i Zemljina atmosfera

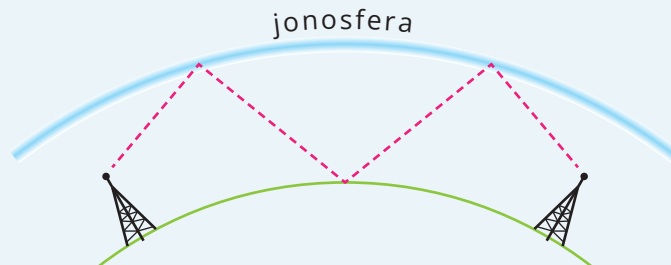
Na frekvencijama signala iznad 30 MHz, predajnik i prijemnik moraju biti međusobno vidljivi, odnosno između njih mora postojati optička vidljivost (engl. *line of sight*, **LOS**). Radio-komunikacija između dvije zemaljske radio-stanice u ovom slučaju odvija se tako da putanja prostiranja radio-talasa kojima se prenose signali mora biti iznad horizonta. U protivnom, Zemljina površina i njena zakrivljenost blokiraju radio-talase ili će ih reflektovati u neželjenom smjeru.

Svi slojevi Zemljine atmosfere imaju značajan uticaj na prostiranje elektromagnetnih talasa, pa zato od njihovih fizičkih svojstava zavisi kvalitet prijema signala koji se prenosi elektromagnetnim talasom. Zemljina atmosfera može se podijeliti na tri osnovna sloja: troposfera, stratosfera i jonosfera.

Troposfera je sloj atmosfere uz Zemljinu površinu. Proteže se do oko 11 km visine. U troposferi nastaju gotovo sve meteorološke pojave, i ona sadrži oko 75% ukupne materije atmosferskog omotača. Uslovi u troposferi (pritisak, temperatura, vlažnost) utiču na svojstva emitovanih elektromagnetnih talasa pri njihovom prostiranju. Područje troposfere najvažnije je za prostiranje ultrakratkih talasa.

Stratosferski sloj proteže se na visinama 11–80 km, i to je sloj bez uobičajenih meteoroloških pojava. Za stratosferu je važno da skoro uopšte ne sadrži vodenu paru.

Jonosfera je gornji sloj atmosfere, prostire se do 400 km iznad površine Zemlje, a sastoji se od jonizovanih čestica. Na ovim visinama vazduh je jako razrijeđen, pa su atomi i molekuli vazduha snažno izloženi radijaciji koja potiče od Sunca. Ultravioletno zračenje uzrokuje razdvajanje električno neutralnih atoma i molekula razrijeđenog vazduha na negativne i pozitivne čestice – jone, to jest uzrokuje jonizaciju atoma i molekula. Jonosfera, koja je po ovoj pojavi dobila i ime, postaje sloj atmosfere koji za EMT određenih talasnih dužina predstavlja prepreku, i od kojeg se ovi talasi reflektuju nazad na Zemlju. Ovakvim načinom prostiranja, signal se može primiti stotinama kilometara daleko od predajnika (slika 5.21).



Slika 5.21. Jonosferski talas

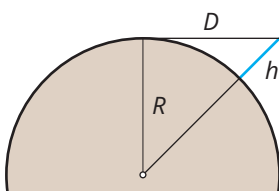
5.2.3. Domet RF signala

Prirodna zakrivljenost Zemljine površine ima velik uticaj na domet elektromagnetnih talasa, odnosno signala određene radio-frekvencije, **RF signala**. Domet RF signala zavisi od snage signala i optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, to jest predajne i prijemne antene.

Zemlja ima oblik lopte, pa je njena površina zakrivljena. Daljina optičke vidljivosti (D) zavisi od zakrivljenosti Zemljine površine, odnosno od poluprečnika Zemlje (R), i od visine antene (h) koja emituje signal.

Primjenom Pitagorine teoreme, sa slike 5.22 vidi se da je teorijski domet signala (daljina optičke vidljivosti) D :

$$D = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2} \quad (5.2).$$



Slika 5.22. Daljina optičke vidljivosti

Kako je $h \ll R$, onda je:

$$D = \sqrt{2Rh} \approx 3,57 \cdot \sqrt{h} \text{ [km]} \quad (5.3).$$

U ovoj formuli R je poluprečnik Zemlje (6378 km), dok se sa h označava visina antene izražena u metrima.

Primjer 5.5. Izračunati daljinu optičke vidljivosti antene postavljene na:

- a) soliteru u Budvi, ako je ukupna visina antene i solitera $h = 50$ m.
- b) na Lovćenu, ako je ukupna visina planine i antene $h = 1800$ m.

Rezultat:

- a) $D = 25,24$ km
- b) $D = 151,5$ km.

Domet signala daleko je manji od daljine optičke vidljivosti, jer zavisi od snage signala koji emituje predajnik, kao i od njegove talasne dužine.

Gubici signala kroz slobodni prostor računaju se po formuli:

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (5.4),$$

gdje je λ talasna dužina signala, a d rastojanje predajnika i prijemnika.

Radi praktične primjene, u inženjerskoj praksi formula za gubitke u slobodnom prostoru koristi se u sljedećem obliku:

$$\alpha_0 = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 32,44 + 20 \log f + 20 \log d \text{ [dB]}. \quad (5.5),$$

gdje su: f – učestanost izražena u MHz, d – rastojanje u km.

Primjer 5.6. FM radio-predajnik emituje signal učestanosti 96 MHz. Koliki su gubici signala na rastojanju od 5 km?

Rješenje:

Gubitke predajnog emitovanog signala kroz slobodan prostor možemo dobiti primjenom prethodne formule 5.5:

$$\begin{aligned} \alpha_0 \text{ [dB]} &= 32,44 + 20 \log f + 20 \log d \\ &= 32,44 + 20 \log 96 + 20 \log 5 \\ &= 32,44 + 39,64 + 13,97 \\ &= 86,05 \text{ dB.} \end{aligned}$$

Na prostiranje EMT imaju uticaj i meteorološki uslovi, sastav tla i Zemljino magnetno polje.

Elektromagnetni talas se kroz vazduh prostire pravolinijski, sve dok vazduh ne promeni svoje električne osobine. To se najčešće dešava usljed promjene meteoroloških uslova.

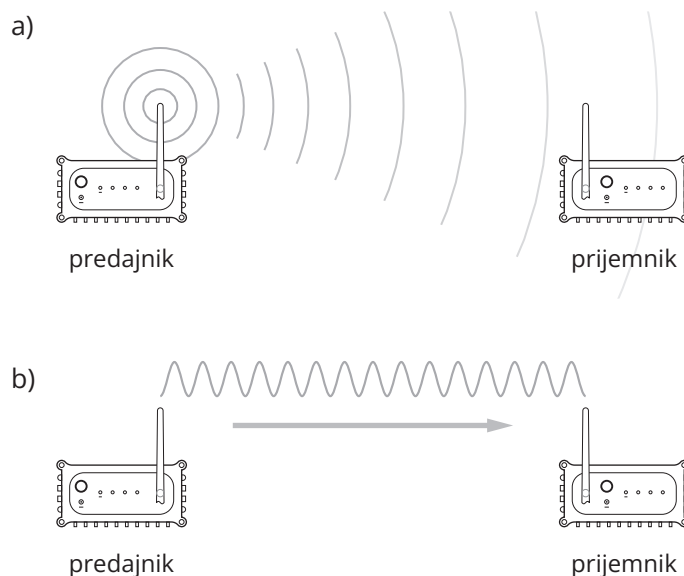
EMT kraćih talasnih dužina, posebno mikrotalasi, gube energiju usljed apsorpcije u kapljicama vode i raspršivanja u njima. Milimetarski talasi dodatno se apsorbuju u vodenoj pari.

Sastav tla utiče na njegovu provodljivost, odnosno na refleksiju talasa, i samim tim i na prostiranje EMT. Neke površine, kao što su jezera, mora, pustinje, povećavaju vjerovatnoću pojave slabljenja, pa i iščeznuća talasa.

Zemljino magnetno polje takođe ima uticaj na prostiranje EMT. Najveći uticaj Zemljino magnetno polje ima na satelitsku komunikaciju.

5.2.4. Mehanizmi prostiranja EMT

Bežična komunikacija ostvaruje se prenosom signala određene radio-frekvencije, RF signala, između stanice koja emituje (predajnika) i stanice koja prima signal (prijemnika). Signali se emituju i primaju predajnim i prijemnim antenama. Osnovni preduslov za ostvarenje komunikacije između predajnika i prijemnika jeste da oni budu podešeni na istu frekvenciju, ili – kako se to kaže – da budu na istom kanalu. Radi jednostavnosti, pretpostavimo da predajnici i prijemnici koriste antenu koja u svim pravcima jednako emituje ili prima RF signal, kao što je prikazano na slici 5.23a. Svaki krug predstavlja sferni dio talasa koji proizvodi predajnik i koji se prostire u tri dimenzije. U praksi se, radi jednostavnosti, za prikazivanje RF signala koristi oblik talasa, kao što je predstavljeno na slici 5.23b.



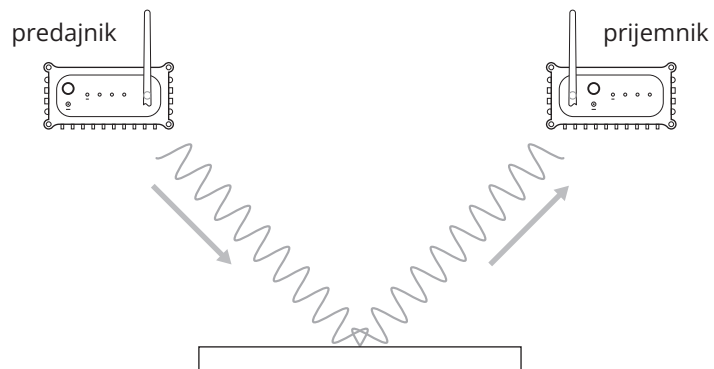
Slika 5.23. Predstavljanje bežičnih signala

Na prostiranje RF signala utiču objekti i materijali koji se nalaze na putu od predajnika do prijemnika. Zbog udaljenosti predajnika i prijemnika, snaga signala slabi. Osim slabljenja, pri prostiranju radio-talasa dolazi do pojave odbijanja, prelamanja, upijanja, difrakcije i rasijanja talasa. Sve te pojave zavise od frekvencije.

Odbijanje, prelamanje, upijanje, difrakcija i rasijanje elektromagnetnih talasa zavise od frekvencije.

5.2.4.1. Odbijanje (refleksija)

Ukoliko RF signal na putu kroz slobodan prostor naiđe na neku prepreku, onda se on može odbiti – reflektovati (slika 5.24). Ugao odbijanja signala obično je jednak njegovom upadnom uglu, odnosno uglu pod kojim signal nailazi na prepreku. Refleksija se javlja usljed odbijanja radio-talasa od okolnog terena i okolnih objekata. Bežični signali na otvorenom prostoru takođe se odbijaju i od vodene površine ili slojeva atmosfere. U prenosu signala, odbijanje je korisno svojstvo RF signala, jer omogućuje komunikaciju i u slučaju kada između predajnika i prijemnika ne postoji optička vidljivost. U tom slučaju, do prijemnika ne stiže direktan signal, već samo reflektovani, koji (iako slabiji) nosi informaciju.

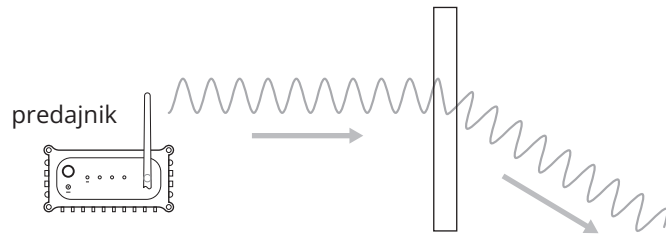


Slika 5.24. Refleksija RF signala

5.2.4.2. Prelamanje (refrakcija)

Prelamanje ili refrakcija talasa nastaje pri prelazu RF signala između dvije sredine različitih gustina. Zbog različitih gustina, različita je i brzina prostiranja signala, što za posljedicu ima promjenu pravca prostiranja EMT. Ugao prelamanja zavisi od osobina materijala (indeksa prelamanja), kao i od veličine upadnog ugla signala, i izračunava se prema Snelijus–Dekartovom zakonu, koji smo već pomenuli.

Prelamanje se može zamisliti kao povijanje signala prilikom prolaska kroz prepreku. Takva situacija predstavljena je na slici 5.25.

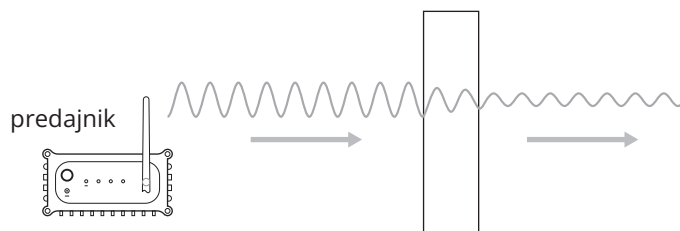


Slika 5.25. Prelamanje RF signala

Prelamanje signala može se desiti kada signal prolazi kroz slojeve vazduha različitih gustina, ili kada signal prolazi kroz zidove zgrade. Posebno je važno prelamanje usljed promjene indeksa prelamanja u nižim slojevima atmosfere. Zbog toga se radio-talas ne prostire duž prave linije, već se zakrivljuje – povija. Usljed toga je zona pokrivanja predajnika obično veća. Međutim, kako se karakteristike atmosfere (kao što su temperatura ili vlažnost) neprekidno mijenjaju, usljed tih promjena mijenja se i nivo prijemnog signala.

5.2.4.3. Upijanje (apsorpcija)

Upijanje (apsorpcija) javlja se kada radio-talas nailazi na prepreke koje su u određenom stepenu za njega providne, kao što su npr. zidovi (slika 5.26), ali ipak utiču na njegovu snagu. RF signal oslabiće ako materijal kroz koji prolazi apsorbira njegovu energiju. Što je materijal gušći, to je i slabljenje signala (usljed apsorpcije) veće.



Slika 5.26. Apsorpcija RF signala

Ovaj mehanizam, iako slabi jačinu talasa, omogućuje prijem radio-signala unutar zgrada (engl. *in-door*).

5.2.4.4. Difrakcija

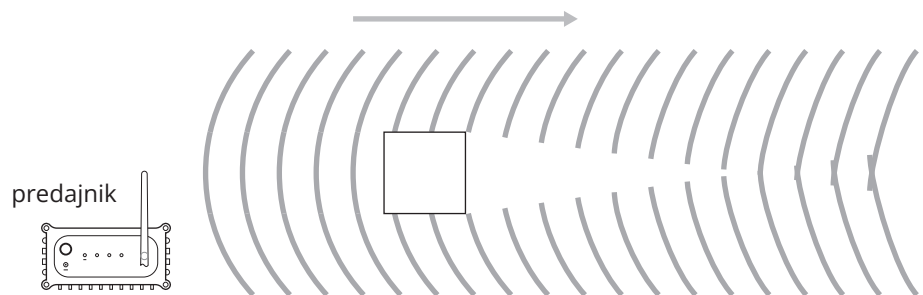
Difrakcija predstavlja pojavu prividnog skretanja talasa sa prvobitnog pravca prostiranja pri njegovom nailasku na ivice otvora ili na prepreku. Pojava se objašnjava Hajgenovim principom – da svaka tačka pogođena talasom postaje novi izvor talasa.



Kristijan Hajgens (1629–1695), holandski matematičar, astronom i fizičar. Smatra se jednim od najsvestranijih naučnika. Tvrdio je da svjetlost ima talasnu prirodu, što je znatno kasnije i naučno dokazano. Napisao je prvu knjigu o teoriji vjerovatnoće. Izumio je sat sa klatnom.

U skladu sa Hajgensovim principom, ako talasi naiđu na neku prepreku čije su dimenzije približne njegovoj talasnoj dužini, ta će prepreka i sama postati izvor talasa. Zbog toga će, u sjenci koju čini prepreka, nastati interferencija talasa – onih koji dolaze ka prepenci i onih koje prepreka generiše. RF signal se prividno savija oko prepreke i može da se dalje prostire bez obzira na prepreku.

Na slici 5.27 vidi se kako prepreka može prouzrokovati difrakciju RF signala. Difrakcija uzrokuje da se signal regeneriše iza prepreke. Takve osobine omogućavaju da se signal primi čak i kada između predajnika i prijemnika postoji veći objekat, odnosno omogućava se radio-komunikacija i u slučajevima kada ne postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika (NLoS slučaj, engl. *non-line of sight*).

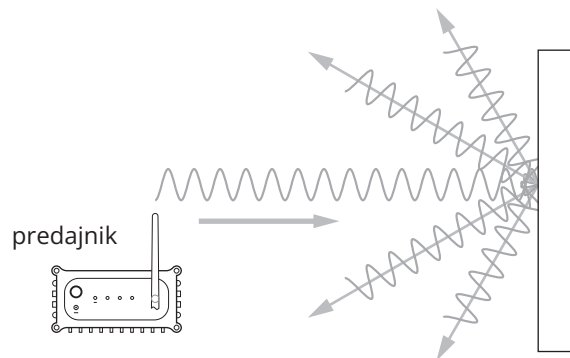


Slika 5.27. Difrakcija RF signala

5.2.4.5. Rasijanje (disperzija)

Kada RF signal nailazi na prepreku neravne površine, signal se od malih djelova ove površine može odbiti u više pravaca (slika 5.28). Riječ je o rasijanju (rasipanju, disperziji) signala. Rasijanje radio-talasa dešava se kada na putu prostiranja talasa postoje prepreke čije su dimenzije znatno manje od talasne dužine signala. Ova pojava slična je difrakciji, osim što se kod disperzije radio-talasi rasipaju u raznim smjerovima.

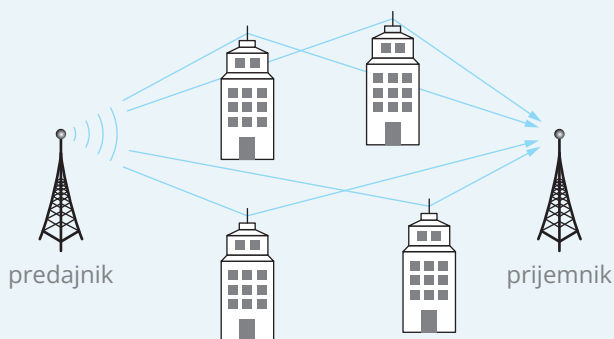
Pojava disperzije čini nivo signala nestabilnim.



Slika 5.28. Rasijanje signala

Propagacija RF signala višestrukim putanjama i feding

U radio-tehnici često se javlja problem propagacije RF signala višestrukim putanjama (engl. *multipath*). U bežičnom prenosu signal se može odbiti od prepreke tako da na mjesto prijemnika dolazi više reflektovanih signala (slika 5.29).



Slika 5.29. Višestruko prostiranje signala (multipath)

S obzirom na to da reflektovani signali prelaze različite putanje, oni mogu na mjesto prijema pristizati u različitim trenucima. U zavisnosti od razlike u pređenom putu direktnog i reflektovanog talasa, zbir reflektovanih signala može da bude promjenljive snage, ali uvijek slabiji od direktnog signala. U najnepovoljnijim slučajevima može doći i do potpunog iščeznuća signala na mjestu prijema. Pojava iščeznuća signala na mjestu prijema naziva se **feding**.

Problem fedinga često je izražen i kod bežičnih mreža na manjim prostorima (LAN). RF signal ponekad će kasniti ili biti izmijenjen usljed refleksije, prelamanja ili difrakcije. Kada takav signal, zajedno sa originalnim signalom, stigne do prijemnika, on prima oslabljen signal. Da bi se riješio ovaj problem, koriste se različite tehnike, kao što je MIMO.

MIMO (engl. *multiple - input-multiple - output*) predstavlja komunikacioni sistem sa više prijemnih i predajnih antena koje šalju i primaju podatke u isto vrijeme. Osnovna ideja MIMO prenosa jeste da se signali na predajnim antenama na jednom kraju, i prijemnim antenama na drugom, kombinuju na takav način da kvalitet veze, ili brzina podataka u komunikaciji, budu znatno poboljšani. MIMO sistemi koriste prostorno-vremenske tehnike multipleksa kod kojih se vremenska komponenta signala kombinuje sa prostornom dimenzijom, dobijenom različitim rastojanjima između antenskih elemenata na predajnoj i prijemnoj strani komunikacionog sistema. Jedan od najvećih problema bežičnog prenosa signala jeste propagacija višestrukim putanjama koja dovodi do interferencije i slabljenja signala. Međutim, MIMO sistemi imaju sposobnost da ovaj nedostatak pretvore u prednost, odnosno da višestruku propagaciju iskoriste za bolji kvalitet signala, za smanjenje šuma i za povećanje protoka podataka. Ovo je i najznačajnija osobina MIMO tehnologija.

5.2.5. Snaga RF signala

Mjerna jedinica za snagu RF signala kao jednog od njegovih najvažnijih parametara jeste vat (W) ili njegov hiljaditi dio – milivat (mW). U tabeli 5.4 date su tipične snage emitovanja različitih izvora.

Tabela 5.4. Snage emitovanja RF signala

Izvor zračenja	Izlazna snaga
Radio predajnik na kratkotalasnom području	500 kW
TV predajnik	50 kW
Mobilni telefon	200 mW
Pristupna tačka bežične lokalne računarske mreže	100 mW

Kako je snaga signala veoma promjenljiva, otežano je njeno računanje. Zbog toga je pogodno da se računa nivo snage signala u odnosu na neku referentnu vrijednost snage. Ovaj odnos izražava se u decibelima.

Da bi se izračunao nivo snage u decibelima, koristi se formula:

$$n_p \text{ [dB]} = 10 \log (P_{sig}/P_{ref}),$$

gdje su: n_p nivo snage koji se traži u decibelima, P_{sig} snaga signala a P_{ref} referentna snaga. U praksi se za referentnu snagu uzima vrijednost od 1 mW ili 1 W. Da bi bilo jasno sa kojom se referentnom snagom upoređuje snaga nekog signala, uvode se oznake:

- dBm – nivo snage signala računa se u odnosu na referentnu snagu od 1 mW (slovo m u skraćenici dBm odnosi se na slovo m u oznaci za milivate)
- dBw – nivo snage računa se u odnosu na referentnu snagu od 1 W (slovo w u skraćenici dBw odnosi se na slovo w u oznaci za vate).

Za bežične lokalne računarske mreže najčešće se koristi mjerna jedinica dBm, jer je snaga uređaja reda veličine do 100 mW.

NAPOMENA

Nivo snage u dBm zove se apsolutni nivo snage, koji se dobija iz normalnog generatora. Normalni generator definiše se kao serijska veza generatora naizmjenične elektromotorne sile od 1,55 V, unutrašnje otpornosti 600 Ω i potrošača od 600 Ω koji razvija snagu od 1 mW. Jedinica dBm označava da je odnos nivoa snage izračunat prema normalnom generatoru, odnosno za snagu od 1 mW na potrošaču od 600 Ω.

Primjer 5.7. Pristupna tačka (*access point* – AP) bežične mreže emituje signal snage 100 mW. Koliki je nivo snage signala u dBm?

Rješenje:

Nivo izlazne snage AP uređaja (u dBm) jeste:

$$n_p \text{ [dBm]} = 10 \log (100 \text{ mW}/1 \text{ mW}) = 20 \text{ dBm.}$$

Primjer 5.8. Izraziti u dBm nivo izlazne snage signala, od a) 1 mW i b) 0,5 mW.

Rješenje:

a) Nivo snaga signala od 1 mW u dBm iznosi

$$10 \log (1 \text{ mW}/1 \text{ mW}), \text{ odnosno } 0 \text{ dBm.}$$

b) Nivo snage signala od 0,5 mW u dBm iznosi

$$10 \log (0,5 \text{ mW}/1 \text{ mW}) = -3 \text{ dBm.}$$

Korisno je zapamtiti:

- Kada se izlazna snaga signala prepolovi, promjena nivoa izlazne snage približno je -3 dBm.
- Kad se izlazna snaga signala udvostruči, promjena nivoa izlazne snage približno je $+3$ dBm.
- Kad je izlazna snaga jednaka referentnoj snazi signala, onda je izlazni nivo snage uvijek 0 dBm.

DODATAK +

ANTENE

Predaja i prijem signala ostvaruju se pomoću antena. Antena predstavlja osnovnu komponentu svakog primopredajnog sistema koji koristi slobodan prostor kao prenosni medijum između predajnika i prijemnika.

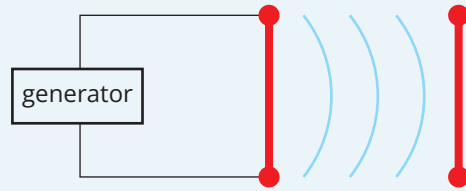
Antene su pretvarači električnih signala visokih učestanosti u elektromagnetno zračenje (predajna antena), i obrnuto: pretvarači snage elektromagnetnog zračenja u električni signal visoke učestanosti (prijemna antena). Antena može biti i primopredajna; u praktičnoj primjeni kod primopredajnih uređaja realizuje se kao zajednička antena za predaju i prijem signala.

Oblik i veličina antena uglavnom su određeni opsegom učestanosti u kojem emituju i primaju elektromagnetne talase. Obično je dužina antene reda veličine talasne dužine signala koji emituje ili prima. Tako, na primjer, imamo polutalasne antene dužine $\lambda/2$, četvrttalasne dužine $\lambda/4$ i slično.

Osnovne karakteristike antena su: dijagram (usmjerenost) zračenja antene, pojačanje antene, radni opseg, karakteristična impedansa, polarizacija antene i slično.

Najjednostavniji model antene jeste **dipol**. To je provodnik određene dužine sa dvije sfere na krajevima provodnika. Sfere imaju ulogu kondenzatora koji se naizmjenično puni i prazni, tako da kroz provodnik protiče struja. Ako je provodnik induktivni element, onda on sa kapacitivnim sferama čini otvoreno oscilatorno kolo. Kada se dipol priključi na generator, počće oko sebe da stvara elektromagnetno zračenje, počće da zrači. Na ovom

principu zasniva se bežični prenos informacija. Na slici 5.30 prikazana je tehnika bežičnog prenosa između dvije dipol antene.



Slika 5.30. Bežični prenos između dvije dipol antene

Antene se mogu dijeliti prema različitim kriterijumima. U telekomunikacijama su posebno značajni kriterijumi koji se odnose na učestanost signala koje antene emituju ili primaju, kao i kriterijumi koji se odnose na usmjerenost zračenja antena.

S obzirom na učestanost, najčešće se primjenjuju ultrakratkotalasne (UKT) i mikrotalasne antene.



Slika 5.31. Prijemna Yagi antena

Ultrakratkotalasnim (UKT) antenama emituju se EMT za prenos televizijskih i radio-programa. Na slici 5.31 prikazana je jedna prijemna UKT antena – Yagi antena. Ona se sastoji od više paralelnih elemenata koji predstavljaju tzv. dipole, elemente sa dva pola. Elementi na anteni imaju različite funkcije. Neki od njih (reflektori) reflektuju, odnosno usmjeravaju primljeni signal ka elementu koji ga prima i preko odgovarajućeg kabla sprovode dalje ka prijemniku.

Mikrotalasne antene najčešće se realizuju kao otvoren kraj **talasovoda**, šuplje cijevi koja služi kao provodnik signala veoma visokih frekvencija. Radi boljeg usmjeravanja zračenja, tim antenama dodaju se reflektori, koji usmjeravaju snop zračenja u određenom pravcu. Reflektor se izrađuje od lima ili metalne mreže, i najčešće je paraboličnog oblika (slika 5.32). Ključni elementi potrebni za uspostavljanje mikrotalasnih veza jesu parabolične antene. Takve antene obično su pričvršćene na neki nosač, i usmjeravaju uzak snop za postizanje prenosa po liniji optičke vidljivosti do prijemne antene.



Slika 5.32. Parabolična antena

Mikrotalasne antene obično su postavljene na određenoj visini iznad zemlje da bi se uspostavila optička vidljivost predajne i prijemne antene. Ako se želi postići prenos na veće udaljenosti, koristi se serija **radio-relejnih** stanica. One predstavljaju veze od tačke do tačke, koje se nadovezuju jedna na drugu.

S obzirom na kriterijume koji se odnose na usmjerenost zračenja, antene se dijele na usmjerene i neusmjerene ili omnidirekzione antene. Kod usmjerenih antena, predajna antena emituje usmjereni elektromagnetni snop prema određenoj prijemnoj anteni. Ovakav način prenosa zahtijeva precizno podešavanje predajne i prijemne antene. Međusobno usmjeravanje antena

na većim udaljenostima obično se vrši uz primjenu geografskih karata i kompasa, odnosno busole.

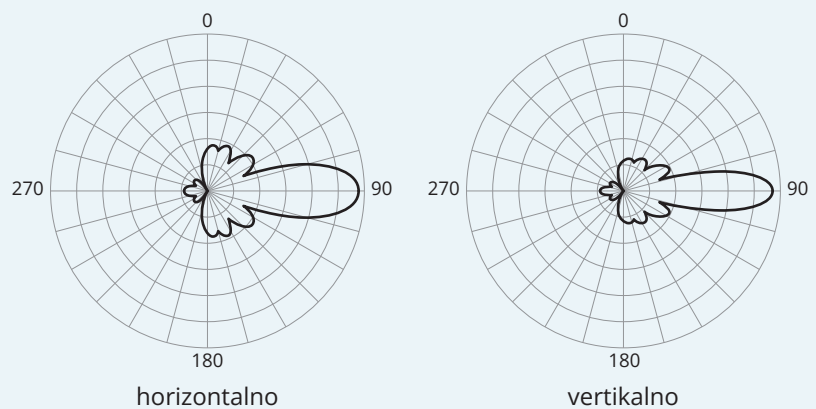
Kod neusmjerenih antena, emitovani signal prostire se u svim pravcima, i može biti primljen od strane više prijemnika koji se nalaze na različitim pravcima u odnosu na predajnu antenu. Ovakav način prenosa pogodan je za emitovanje radio i TV programa (radio i TV difuzija).

Usmjerene antene

RF signal se u uskom snopu šalje predajnom antenom na velika rastojanja duž putanje koju predajna antena „vidi“. Usmjerene antene koriste se za takvo slanje signala, jer imaju sposobnost da RF energiju usmjere u uzak snop. Ovakav tip antene koristi se za uspostavljanje veze kada su predajna i prijemna antena znatno udaljene.

Jedna od važnih karakteristika antene jeste dijagram zračenja. Dijagram zračenja antene opisuje kako antena zrači u odgovarajućim smjerovima.

Usmjerene antene imaju uzak dijagram zračenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Na slici 5.33 prikazan je dijagram zračenja usmjerene antene u horizontalnoj i vertikalnoj ravni.



Slika 5.33. Dijagram zračenja usmjerene antene u horizontalnoj i vertikalnoj ravni

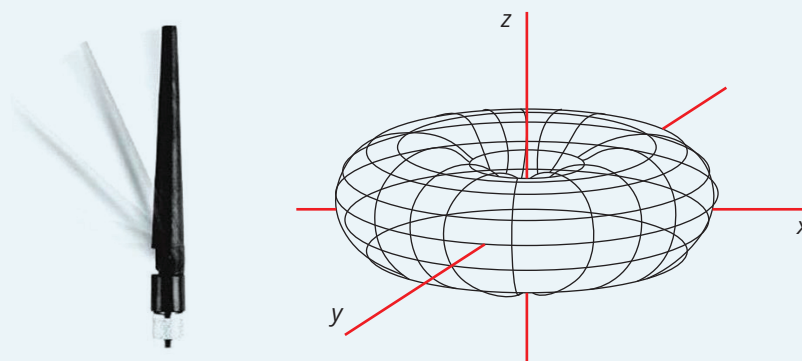


Slika 5.34. Usmjerena parabolična antena

Na slici 5.34 prikazan je jedan od oblika usmjerene antene, koje koriste parabolične tanjire kako bi primljene signale usmjerile na antenu koja se nalazi u njenom centru.

Omnidirekzione antene

Omnidirekzione antene, kakva je antena prikazana na slici 5.35, obično se koristi kod bežičnih lokalnih računarskih mreža. To su skupovi računara u manjim prostorima međusobno povezanih ne kablovima nego bežično. Antena prikazana na slici može se preklapati u različitim smjerovima u zavisnosti od toga kako je postavljena pristupna tačka.



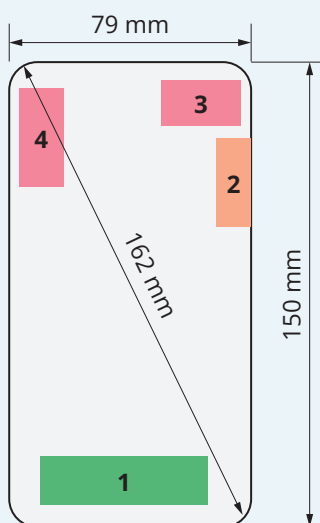
Slika 5.35. Omnidirekciona antena i njen dijagram zračenja

Omnidirekciona antena signal emituje ravnomjerno u svim pravcima, u obliku torusa, krofne, koji se vidi na desnoj strani slike 5.32. Ovaj tip antene koristi se u bežičnim lokalnim računarskim mrežama radi pokrivanja signalom velike prostorije ili sprata kada se pristupna tačka nalazi u sredini.

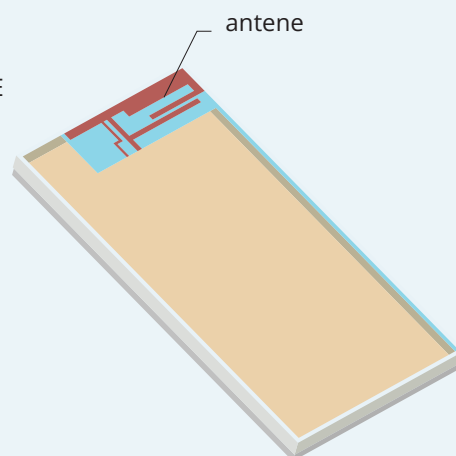
Mikrotrakaste antene

Mikrotrakasta antena predstavlja odsječak provodnika čija je dužina približno jednaka polovini talasne dužine signala koji se prenosi. U principu, takve antene najčešće se realizuju kao kombinacija nekoliko mikrotrakastih antena različitih dužina, odnosno različitih rezonantnih frekvencija. Imaju veliku primjenu kod mobilnih telefona.

Na slici 5.36 prikazan je raspored i izgled mikrotrakastih antena jednog mobilnog telefona. Za svaku antenu dati su opsezi frekvencija za koje su antene namijenjene, kao i uloga antena, da li su predajne (Tx), prijemne (Rx) ili su primopredajne (Tx/Rx).



1. **Glavna antena (Tx/Rx)**
 - 835/1700/1900 MHz UMTS
 - 835/1900 MHz GSM/GPRS/EDGE
 - LTE B2/B4/B5/B17
2. **WiFi antena (Tx/Rx)**
 - 2.4 GHz
 - 5 GHz
3. **GPS Antena (Rx)**
4. **Pomoćna antena (Rx)**
 - 835/1700/1900 MHz UMTS
 - LTE B2/B4/B5/B17



Slika 5.36. Raspored i izgled mikrotrakastih antena jednog mobilnog telefona

Antena je kod mobilnog telefona integrisana u njegovo kućište. Slična rješenja koriste se i u drugim prenosivim uređajima na kojima se antene ne vide (tablet, laptop, pametni sat i drugi).

ZANIMLJIVOST

Najveća parabolična antena jeste radio-teleskop (za astronomiju) koji se nalazi u Portoriku. Prečnik ove antene je 305 m; ima dobitak od 10 miliona, što je oko 70 dB na frekvenciji 2,38 GHz (slika 5.37).



Slika 5.37. Radio-teleskop u Portoriku

Uporedni prikaz najznačajnijih karakteristika medijuma za prenos dat je u tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Poređenje medijuma za prenos

	Upredene parice	Koaksijalni kabal	Optičko vlakno	Mikrotalasi	Sateliti
Brzina prenosa bita	Zavisno od kategorije, od 10 Mb/s do nekoliko desetine Gb/s	Može da podrži gigabitske brzine	Reda veličine Tb/s	Zavisno od učestanosti signala, od 10 do 300 Mb/s	Zavisno od učestanosti signala, od 10 do 300 Mb/s
Osjetljivost na smetnje	Električne smetnje od susjednih kablova. Upredanjem žica redukuju se šumovi koji zavise od učestanosti signala	Metalni omotač oko kabla u najvećoj mjeri eliminiše električne smetnje	Otporni na električne smetnje	Čvrsti objekti izazivaju smetnje. Potrebna je direktna optička vidljivost između učesnika u komunikaciji	Smetnje nastaju zbog atmosferskih uslova. Pogoršavaju se na višim učestanostima
Domet veze	Zavisno od debljine kabla i bitske brzine. Obično su ograničeni do par stotina metara, ali je moguć prenos signala na udaljenostima od 5–6 km, bez pojačavača	Zavisno od bitske brzine, moguć prenos signala na udaljenostima od 5–6 km, bez pojačavača	Stotine kilometara	Zavisno od konfiguracije terena i visine antena, nekoliko desetina kilometara	Hiljade kilometara
Tipične primjene	Računarske mreže, telefonija	Video-tehnika, kablovska televizija	Za povezivanje telefonskih i računarskih mreža na međugradskim rastojanjima	Obično se koriste na lokacijama kada upotreba kablova nije praktična, na primjer za povezivanje telefonskih mreža u rijetko naseljenim oblastima	Komunikacija između država, kontinenta

Rezime

- ▶ Medijumi za prenos mogu se podijeliti na vođene i nevođene. Vođeni medijumi su oni kod kojih se signal prenosi kroz provodnike kao što su bakarna parica i koaksijalni kabl, kroz koje se signal prenosi u formi električnog signala, i optički kabl, kroz koji se signal prenosi u obliku svjetlosnih impulsa. Kroz nevođene medijume signal se prenosi kroz atmosferu ili slobodan prostor u formi elektromagnetnog talasa.
- ▶ Dvije izolovane žice, najčešće napravljene od bakra i međusobno spiralno isprepletene, čine upredenu paricu.
- ▶ Koaksijalni kabl sastoji se od dva provodnika, spoljašnjeg i unutrašnjeg. Spoljašnji provodnik, izrađen u obliku šupljeg cilindra, obuhvata unutrašnji provodnik, koji je izrađen od pune žice. Provodnici su međusobno odvojeni čvrstim izolatorom.
- ▶ Električni otpor u kablovima izaziva slabljenje signala. Slabljenje se izražava u decibelima, i to kao logaritamski odnos količnika emitovane (P_t) i primljene (P_r) snage signala koji se prenosi.
- ▶ Optičko vlakno je dugačak, tanak, savitljiv cilindar od stakla koji se sastoji od dva sloja, unutrašnjeg i spoljašnjeg omotača. Oko optičkog vlakna postoji zaštitni sloj, čija je svrha da mehanički zaštiti dva prethodna sloja i da omogućiti njegovo lakše savijanje, a informacija se prenosi putem svjetlosti. Pri korišćenju optičkog vlakna potrebno je električni signal pretvoriti u svjetlosni, a na drugoj strani – dobijeni svjetlosni signal opet pretvoriti u električni. Ovaj proces obavljaju laseri i diode.
- ▶ Optičko vlakno je kao medijum za prenos podataka brže, pouzdanije i sigurnije od bakarnih provodnika zato što ne prenosi električne već svjetlosne signale. Zbog toga nema elektromagnetnih smetnji i ometanja signala koji se prenose optičkim vlaknom, a samim tim znatno je smanjena vjerovatnoća greške pri prenosu binarnih svjetlosnih signala. Vlaknom se mogu prenositi signali velikih raspona učestanosti, čak i reda veličine THz. Zbog toga optička vlakna nude i velike brzine protoka signala, koje u teoriji dostižu i do 50.000 Gb/s.
- ▶ Bežični sistemi kao medijum povezivanja koriste elektromagnetne talase. Elektromagnetni talas je fizička pojava koja se ispoljava prostiranjem električnih i magnetnih oscilacija kroz slobodan prostor brzinom svjetlosti ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).
- ▶ Pri prostiranju radio-talasa dolazi do pojave odbijanja, savijanja, rasipanja, upijanja i prelamanja talasa.
- ▶ Domet RF signala zavisi od snage signala i optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, odnosno predajne i prijemne antene. Domet signala daleko je manji od daljine optičke vidljivosti, jer zavisi od snage signala koji emituje predajnik, kao i od njegove talasne dužine

Manje poznate riječi

interferencija – smetnje u poruci koja putuje od predajnika do prijemnika usljed uticaja jednog signala na drugi, koja nastaje usljed elektromagnetne indukcije i emitovanja elektromagnetnih talasa od različitih izvora; elektromagnetna indukcija – pojava generisanja struje u provodniku koji se nalazi u bliskom polju drugog provodnika kroz koji teče

promjenjiva struja; preslušavanje – pojava poznata u telefoniji kada dolazi do miješanja više govornih signala; koherentan – međusobno usklađen; koaksijalan – koji ima zajedničku osovinu, osu; totalan – cjelovit, potpun, kompletan; profil – izgled lica ili predmeta posmatranog sa strane.

Preporuka za korišćenje dodatne literature

Ukoliko želiš da produbiš znanja iz ovog poglavlja, korisna je knjiga *Andrew Tanenbaum: Računarske mreže, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Mikro knjige, Beograd, 2005*. Medijumi za prenos,

kao i principi na kojima su zasnovane telekomunikacione tehnologije, objašnjavaju se na izuzetno razumljiv i zanimljiv način.

Pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja poglavlja

1. Opiši vrste i karakteristike medijuma za prenos signala.
2. Navedi i ukratko objasni glavna svojstva RF signala.
3. Koje su pojave pri propagaciji signala slobodnim prostorom korisne sa stanovišta dometa signala? Objasni odgovor.
4. Ako postoji RF linija vidljivosti, znači li to da obavezno postoji i optička linija vidljivosti? Objasni odgovor.
5. Izračunaj otpornost bakarnog provodnika dužine 100 m ako mu je prečnik: a) 0,6 mm, b) 0,9 mm.

Rješenje: Otpornost bakarnog provodnika direktno je proporcionalna specifičnoj otpornosti (koja je konstantna za svaki provodnik) i dužini provodnika, a obrnuto je proporcionalna površini poprečnog presjeka provodnika. Poluprečnik provodnika je polovina prečnika. Površina poprečnog presjeka provodnika jeste površina kruga. Otpornost bakarnog provodnika računa se po formuli:

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

gdje je ρ – specifična otpornost bakra ($\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$), L – dužina provodnika u metrima i S – površina poprečnog presjeka provodnika u m^2 .

$$\begin{aligned} \text{a) } R &= \rho \cdot \frac{L}{S} \\ &= 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} \cdot \frac{100 \text{ m}}{\left(\frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 3,14 \text{ m}^2} \\ &= \frac{168 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}^2}{0,283 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 59364 \cdot 10^{-2} \Omega = 5,45 \Omega. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } R &= \rho \cdot \frac{L}{S} \\ &= 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} \cdot \frac{100 \text{ m}}{\left(\frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 3,14 \text{ m}^2} \\ &= \frac{168 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}^2}{0,636 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 26415 \cdot 10^{-2} \Omega = 2,64 \Omega. \end{aligned}$$

6. Slabljenje koaksijalnog kabla na učestanosti od 1 MHz iznosi 7 dB po kilometru dužine. Koliki je odnos snage signala na ulazu u kabl i snage na kraju kabla dužine 2 km?

Rješenje: Slabljenje signala u kablju računa se kao logaritamski odnos emitovane i primljene snage. Slabljenje kabla računa se po formuli:

$$a \text{ [dB]} = 10 \log \frac{P_t}{P_r},$$

gdje je P_T snaga predajnog signala a P_R snaga prijemnog signala. Pošto je kabl dug 2 km, ukupno slabljenje u kablju je

$$a \text{ [dB]} = 2 \cdot 7 \text{ dB} = 14 \text{ dB},$$

pa se može naći odnos emitovane i primljene snage:

$$a \text{ [dB]} = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

$$\log \frac{P_t}{P_r} = \frac{a \text{ [dB]}}{10} = \frac{14}{10} = 1,4, \text{ pa je:}$$

$$\frac{P_t}{P_r} = 10^{1,4} = 25,12.$$

7. Izračunaj talasne dužine signala čije su frekvencije 150 MHz i 900 MHz.

Rješenje: Talasna dužina signala direktno zavisi od brzine svjetlosti a indirektno od frekvencije signala. Brzina svjetlosti je konstantna veličina, i iznosi $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Talasna dužina se računa po formuli:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\text{a) } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{150 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}}} = 0,02 \cdot 10^2 \text{ m} = 2 \text{ m}.$$

$$\text{b) } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{900 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}}} = 0,0033 \cdot 10^2 \text{ m} = 0,333 \text{ m} = 333 \text{ mm}.$$

8. Izračunaj visinu predajne antene potrebnu da se ostvari optička vidljivost sa prijemnikom udaljenim 50 km.

Rješenje: Domet signala – daljina optičke vidljivosti direktno zavisi od visine predajne antene. Domet signala računa se po formuli:

$$D = \sqrt{2Rh} \approx 3,57 \cdot \sqrt{h} \text{ [km]},$$

gdje je h visina predajne antene koja se unosi u metrima. Kvadriranjem lijeve i desne strane dobija se izraz:

$$D^2 = 3,57^2 \cdot h,$$

odakle se može naći izraz za visinu predajne antene:

$$h = \frac{D^2}{3,57^2} = \frac{2500}{12,75} = 196 \text{ m.}$$

9. a) Izračunaj izlaznu snagu bežične pristupne tačke (AP – Access Point) u mW, ako je njena snaga 23 dBm.

b) Ako je izlazna snaga AP-a –13 dBm, koliki je njen ekvivalent u mW?

Rješenje: Nivo izlazne snage pristupne tačke računa se po formuli:

$$n_p \text{ [dBm]} = 10 \log \frac{P}{P_0},$$

gdje je P snaga bežične pristupne tačke, a P_0 referentna snaga koja ima vrijednost 1 mW. Snaga bežične pristupne tačke se može izračunati iz prethodnog izraza:

$$\text{a) } n_p \text{ [dBm]} = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

$$\log \frac{P}{P_0} = \frac{n_p \text{ [dBm]}}{10} = \frac{23}{10} = 2,3$$

$$10^{2,3} = 199,5$$

Iz prethodnog izraza može se dobiti tražena snaga bežične pristupne tačke:

$$P = P_0 \cdot 199,5 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 199,5 = 0,1995 \text{ W} \approx 200 \text{ mW.}$$

$$\text{b) } n_p \text{ [dBm]} = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

$$\log \frac{P}{P_0} = \frac{n_p \text{ [dBm]}}{10} = \frac{-13}{10} = -1,3$$

$$\frac{P}{P_0} = 10^{-1,3} = 0,05$$

$$P = P_0 \cdot 0,05 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 0,05 = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 50 \text{ } \mu\text{W.}$$

Napomena: Snaga bežične pristupne tačke je mala, i manja je od referentne snage; zato je nivo snage ovog signala u dBm manji od 0.

10. Ako bežična pristupna tačka ima predajnu snagu 100 mW, a onda se prekonfiguriše da ima predajnu snagu od 50 mW, koliko iznosi ta promjena u dBm?

Rješenje: Da bismo izračunali promjenu nivoa predajnih snaga u dBm, moramo izračunati oba nivoa snage u dBm. Slično prethodnom zadatku, prvi nivo predajne snaga je:

$$\begin{aligned}n_{p_1} [\text{dBm}] &= 10 \log \frac{P}{P_0} \\ &= 10 \log \frac{100 \text{ mW}}{100 \text{ mW}} \\ &= 10 \log 1 = 10 \cdot 0 = 0 \text{ dBm}.\end{aligned}$$

Drugi nivo predajne snage je:

$$\begin{aligned}n_{p_2} [\text{dBm}] &= 10 \log \frac{P}{P_0} \\ &= 10 \log \frac{50 \text{ mW}}{100 \text{ mW}} \\ &= 10 \log 0,5 = 10 \cdot (-0,3) = -3 \text{ dBm}.\end{aligned}$$

Promjena nivoa predajnih snaga je:

$$\Delta n_p [\text{dBm}] = n_{p_2} [\text{dBm}] - n_{p_1} [\text{dBm}] = -3 \text{ dBm} - 0 \text{ dBm} = -3 \text{ dBm}.$$

6. Lista engleskih skraćenica korišćenih u udžbeniku

A/D (*analog to digital*) – analogno u digitalno

AI (*artificial intelligence*) – vještačka inteligencija

ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) – alfanumerički kod čija je dužina kodne riječi 7 ili 8 bita, koji se odnosi na slova engleske azbuke, brojeve i specijalne znake

BNC (*British Naval Connector*) – konektor za povezivanje koaksijalnog kabla

bps (*bits per second*) – bita po sekundi, b/s

CD (*compact disc*) – kompakt-disk

CDM (*code division multiplexing*) – multipleksiranje sa raspodjelom kodova

CDMA (*code division multiple access*) – višestruki pristup sa kodnom raspodjelom

CERN (*European Organization for Nuclear Research*) – Evropski centar za nuklearna istraživanja

D/A (*digital to analog*) – digitalno u analogno

dB (*decibel*) – decibel, jedinica za mjerenje nivoa signala

DSSS (*direct sequence spread spectrum*) – direktna sekvenca proširenog spektra

EHF (*extremely high frequency*) – opseg ekstremno visokih učestanosti, od 30 do 300 GHz

FDM (*frequency division multiplexing*) – multipleksiranje sa frekvencijskom raspodjelom kanala

FH (*frequency hopping*) – skakanje frekvencija

FHSS (*frequency hopping spread spectrum*) – prošireni spektar sa frekvencijskim skakanjem

FM (*frequency modulation*) – frekvencijska modulacija

FTP (*foiled twisted pair*) – kabl sa upredenom paricom i folijom

GPS (*Global Position System*) – sistem globalnog pozicioniranja

GSM (*Global System for Mobile Communications*) – globalni sistem mobilnih komunikacija

H2M (*human to machine*) – komunikacija čovjek – mašina

ICT (*information and communication technology*) – informacione i komunikacione tehnologije

IoT (*Internet of things*) – internet-stvari

IP (*Internet protocol*) – skup pravila za komunikaciju između računara u globalnoj mreži internet

IPTV (*Internet protocol television*) – internet-televizija

IR (*infrared*) – infracrven

ISO (*International Standards Organization*) – Međunarodna organizacija za standarde

ITU (*International Telecommunication Union*) – Međunarodna unija za telekomunikacije

LAN (*local area networks*) – lokalne računarske mreže

LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*) – uređaj koji emituje svjetlost i usmjerava ga u uskom snopu

LED (*light emitting diode*) – dioda koja emituje svjetlost – svijetleća dioda

LF (*low frequency*) – opseg niskih učestanosti, do 300 Hz

LOS (*line of sight*) – linija optičke vidljivosti

M2M (*machine to machine*) – komunikacija mašina – mašina

MATLAB (*MATrix LABoratory*) – softver za generisanje signala i njihovu obradu

MIMO (*multiple input, multiple output*) – komunikacioni sistem sa više prijemnih i predajnih antena koji šalje i prima podatke u isto vrijeme

MUX (*multiplexer*) – uređaj za multipleksiranje signala

N (*noise*) – šum

OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) – ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje

OSI (*open systems interconnection*) – otvoren sistemi za umrežavanje i komunikaciju

PCM (*pulse code modulation*) – impulsna kodna modulacija

PDH (*plesyochronous digital hierarchy*) – pleziona digitalna hijerarhija

PN (*pseudo-noise*) – pseudoslučajni šum

RF (*radio frequency*) – radio-frekvencija

R_x (*receiver*) – prijemnik

S/N (*signal/noise*) – odnos srednje snage signala i srednje snage šuma

SDH (*synchronous digital hierarchy*) – sinhrona digitalna hijerarhija

SHF (*super high frequency*) – opseg supervisokih učestanosti, od 3 do 30 GHz

SONET (*synchronous optical NETwork*) – sinhrona optička mreža

STM (*synchronous transport module*) – sinhroni transportni modul

STP (*shielded twisted pair*) – kabl sa upredenom paricom i metalnim omotačem

TCP (*transmission control protocol*) – protokol za upravljanje prenosom podataka u mreži

TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) – skup pravila koji omogućavaju umreženim računarima da dijele resurse putem mreže

TDM (*time division multiplexing*) – multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala

TS (*time slots*) – vremenski segment jednog dijela signala, kod vremenskog multipleksiranja

Tx (*transmitter*) – predajnik

UHF (*ultra high frequency*) – ultravisoka frekvencija

URL (*uniform resource locator*) – jedinstvena oznaka resursa, adresa koja predstavlja lokaciju gdje se objekat nalazi na internetu

USB (*universal serial bus*) – univerzalna serijska magistrala

UTP (*unshielded twisted pair*) – kabl sa upredenim paricama bez omotača

VDSL (*very-high-bitrate digital subscriber line*) – tehnologija koja omogućava prenos telefonskih signala do 1200 m u opsegu do 30 MHz

VHF (*very high frequency*) – veoma visoka frekvencija

WDM (*wavelength division multiplex*) – multipleksiranje po talasnim dužinama signala

XOR (*eXclusive OR*) – isključivo kolo ili kolo za logičko sabiranje

7. Rječnik pojmova iz telekomunikacija

A

A/D konvertor – uređaj koji vrši A/D konverziju.

A/D konverzija – postupak pretvaranja analognog signala u digitalni.

amplituda – najveće rastojanje od vrha talasa u odnosu na trenutak kad nema talasa.

amplitudska karakteristika kola – apsolutna vrijednost funkcije prenosa kola.

antena – pretvarač električnih signala visokih učestanosti u elektromagnetno zračenje, i obrnuto – elektromagnetnog zračenja u signal visoke učestanosti:

- predajna – pretvara električni signal visoke učestanosti u EMT
- prijemna – pretvara energiju EMT u električni signal
- neusmjerena – emituje signal u svim pravcima
- usmjerena – emituje usmjereni elektromagnetni snop u određenom pravcu.

apsorpcija – pojava koja se javlja kada radio-talas prolazi kroz prepreke koje mu upijaju dio snage.

asinhroni prenos – tehnika prenosa podataka u modemske komunikacijama u kojoj se podaci šalju s prekidima, znak po znak, uz upotrebu start i stop bitova radi razlikovanja pojedinačnih znakova.

B

bajt – količina informacije od 8 bita.

bežične mreže – mreže koje koriste radio-talase za prenos signala kroz slobodan prostor, bez korišćenja fizičkih vodova.

bit – najmanja jedinica za količinu informacija.

broadband – širokopoljasan.

broadcast – način komunikacije kada se poruka prenosi od predajnika do više prijemnih stanica, drugi naziv za difuzni prenos.

C

chatbot – integrisani programi za online (onlajn) komunikaciju i interakciju sa korisnicima; posebnu grupu čine četbotovi sa vještačkom inteligencijom.

clock – upravljački impuls, kojeg generiše kvarcni oscilator.

cloud – prostor za skladištenje podataka na internetu.

Č

čtvoropol – električno kolo koje ima dva ulazna i dva izlazna priključka.

D

D/A konvertor – uređaj u kojem se vrši D/A konverzija.

D/A konverzija – postupak pretvaranja digitalnog signala u analogni signal.

dekoder – uređaj na prijemnoj strani komunikacionog sistema u kojem se obavlja postupak dekodiranja.

dekodiranje – postupak kojim se iz kodiranog signala dobija originalna informacija.

demodulacija – postupak kojim se u prijemu iz modulisanog signala izdvaja korisna informacija.

demodulator – uređaj u prijemu u kojem se obavlja postupak demodulacije.

devijacija faze – vrijednost promjene faze signala nosioca.

devijacija učestanosti – vrijednost promjene učestanosti signala nosioca.

difrakcija – pojava prividnog skretanja talasa sa prvobitnog pravca prostiranja pri njegovom nailasku na ivice otvora ili na prepreku.

difuzni prenos – broadcast tehnika prenosa.

dioda – elektronska komponenta koja, u zavisnosti od smjera napona na koji se priključi, dozvoljava ili ne dozvoljava protok struje:

- laserska – radi na principu stimulisane emisije, što omogućuje dobijanje signala velike izlazne snage i znatno užeg spektra zračenja
- LED – poluprovodnička dioda koja emituje svjetlost kada kroz nju prolazi struja.

direktni talas – EMT koji pri svom prostiranju putuje direktno od predajne do prijemne antene.

diskretne poruke – nizovi posebnih elemenata sa konačnim brojem stanja.

disperzija – pojava rasipanja radio-talasa, uzrokovana istovremenom refleksijom prelamanjem i difrakcijom, koja se javlja nailaskom talasa na prepreku.

domen – oblast:

- frekvencijski – oblast u kojoj se signali prikazuju u funkciji učestanosti
- vremenski – oblast u kojoj se prikazuje promjena signala u vremenu.

dupleks – tehnika prenosa signala istovremeno u oba pravca.

E

elektromagnetna indukcija – pojava generisanja napona u provodniku koji se nalazi u promjenljivom magnetnom polju.

elektromagnetni spektar – frekventni opseg elektromagnetskog zračenja.

enkripcija – šifrovanje, tehnika za zaštitu podataka koja se koristi u telekomunikacionim sistemima radi obezbjeđenja tajnosti poruke.

ethernet – standard za prenos podataka u lokalnim računarskim mrežama.

F

fazna karakteristika kola – karakteristika kola koja pokazuje faznu razliku između pobude i odziva sistema.

feding – promjena slabljenja signala, iščeznuće signala na mjestu prijema.

filtar – električno kolo kojim se slabe signali određenih učestanosti:

- granične učestanosti filtra – učestanosti koje predstavljaju granice područja u kojima se slabe signali
- slabljenje filtra – odnos napona na ulazu i izlazu filtra
- filtri propusnici niskih učestanosti (NF filtri) – električna kola koja propuštaju bez slabljenja napone do neke određene učestanosti
- filtri propusnici visokih učestanosti (VF filtri) – električna kola koja napone učestanosti veće od neke određene učestanosti propuštaju bez slabljenja

- filtri propusnici opsega učestanosti – električna kola koja napone čije su učestanosti između f_{c1} i f_{c2} propuštaju bez slabljenja, dok slabe napone čije su učestanosti izvan toga opsega
- filtri nepropusnici opsega učestanosti – električna kola koja napone čije su učestanosti između f_{c1} i f_{c2} slabe (prigušuju), dok napone čije su učestanosti izvan toga opsega propuštaju bez slabljenja
- optimalni filter – filter kojim se koriguje funkcija prenosa sistema kako bi se minimizirala vjerovatnoća greške u prenosu digitalnog signala.

fotodetektor – optoelektronski elemenat koji energiju svjetlosnog signala pretvara u električnu struju.

fotodioda – poluprovodnički elemenat koji, kada se izloži svjetlosnom zraku, generiše električni signal.

frekvencija (učestanost) – broj ponavljanja (oscilacija, talasa, perioda) u jedinici vremena.

funkcija prenosa – matematički odnos između izlaznog i ulaznog signala nekog sistema.

Furijeova analiza – složen matematički postupak kojim se izračunavaju amplitude i faze članova niza, kojim je predstavljena periodična funkcija.

H

harmonijska analiza – razvijanje periodičnih funkcija (kojima se opisuje složeno oscilovanje) u trigonometrijske funkcije.

harmonik – svaka sinusoida, pojedinačno, koja predstavlja odgovarajuću harmonijsku komponentu signala u domenu učestanosti.

I

impedansa kola – odnos napona i struje u kolu naizmjenične struje.

informacija – podatak koji razrješava neizvjesnost.

interfejs – sprega, veza uređaja u sistemu.

interferencija – smetnje u prenosu signala usljed uticaja jednog signala na drugi.

internet – skup računarskih mreža i uređaja koji su međusobno povezani i koji funkcionišu kao globalna mreža.

internet-protokol – skup pravila za komunikaciju u globalnoj mreži internet.

internet-stvari – ogroman broj uređaja opremljenih sensorima i softverima koji su trenutno povezani na internet kako bi prikupljali i dijelili podatke.

J

jonosferski talas – signal emitovan sa Zemlje koji se odbija natrag od jonosfere.

K

karakteristička impedansa voda – odnos napona i struje u bilo kojoj tački beskonačnog homogenog voda.

koaksijalni kabl – kabl od dva provodnika odvojena izolatorom koji imaju zajedničku osu.

kôd – sistem simbola za konverziju informacije iz jednog oblika u drugi:

- polarni linijski kôd – kôd koji koristi dva polariteta (pozitivan i negativan)
- unipolarni linijski kôd – kôd koji koristi samo jedan polaritet
- zaštitni kôd – kôd kojim se obezbjeđuje detekcija i korekcija grešaka u toku prenosa digitalnih signala.

koder – elektronski sklop u kojem se obavlja kodiranje podataka.

kompresija – uklanjanje suvišnih podataka u informaciji radi njenog sažimanja kako bi se poruka smjestila na manji memorijski prostor ili prenijela kroz kanal koji ima manji propusni opseg.

kontinualne poruke – poruke koje se javljaju kao funkcije vremena i koje imaju sve moguće vrijednosti u odgovarajućim granicama.

korisnik – osoba ili uređaj kome je poruka namijenjena.

kvadratni pravougaoni impulsi – binarni impulsi kod kojih je trajanje logičke jedinice i logičke nule jednako.

L

linearni sistem – sistem kod koga je napon (odnosno struja) na izlazu sistema direktno srazmjern naponu (odnosno struji) na ulazu u sistem.

linija veze – medijum sa odgovarajućim sklopovima kroz koje se signal prenosi od predajnog do prijemnog uređaja.

link – linija veze između dvije tačke.

M

mikrotalasi – dio elektromagnetnog spektra koji se prostire između radio-talasa i infracrvenog zračenja.

modem – uređaj koji obavlja postupak modulacije na predajnoj strani i postupak demodulacije na prijemnoj strani komunikacionog sistema.

modovi – putanje u optičkom vlaknu kojima se prostiru svjetlosni zraci istih karakteristika i istog upadnog ugla.

modulacija – transponovanje signala iz osnovnog u transponovani – VF opseg radi pogodnijeg prenosa na daljinu.

modulator – sklop u kojem se obavlja proces modulacije.

multicast – vrsta broadcast tehnike prenosa kada se poruka prenosi od predajnika do samo jedne grupe prijemnih stanica.

multimedija – tehnički pojam koji se odnosi na kombinovanje više različitih sadržaja (tekst, slika, zvuk, animacija, video).

multipleksiranje – proces istovremenog prenosa više signala po zajedničkom medijumu:

- frekvencijsko – proces multipleksiranja kod koga se raspoloživi opseg frekvencija potreban za prenos signala podijeli na više grupa kojima se informacije prenose nezavisno jedna od druge, što predstavlja frekvencijsku raspodjelu kanala
- kodno – proces kada se učesnicima u komunikaciji, po zajedničkom kanalu, dodjeljuje različit kôd komuniciranja
- vremensko – način višestrukog korišćenja prenosnog medijuma u kojem se vrijeme prenosa dijeli na vremenske odsječke (slotove), što predstavlja vremensku raspodjelu kanala.

N

narrowband – uskopojasan.

nosilac – pomoćni periodični signal kojem se modifikuju neki osnovni parametri i u koji se u procesu modulacije utiskuje originalni signal.

O

open source – softver otvorenog koda koji se može dodatno programirati i besplatno koristiti.

optičko vlakno – tanko vlakno od providnog materijala koje se koristi u telekomunikacijama za prenos signala velikom brzinom:

- monomodno – vlakno kod koga se svjetlost duž vlakna prostire jednom putanjom
- multimodno – vlakno kod koga se svjetlost duž vlakna prostire kroz veći broj mogućih putanja svjetlosnog snopa
- optički prozori – talasne dužine svjetlosnog signala koje se ubacaju u optičko vlakno.

OSI model – skraćenica za model Open System Interconnection (otvoreni sistem za komunikaciju) koji predstavlja slojevitú arhitekturu standardizacije nivoa i vrsta interakcija za računare koji razmjenjuju informacije preko komunikacionih mreža.

osnovni opseg – prenos signala u svom izvornom obliku.

otvoreni standard – skup specifikacija dostupan javnosti, koji opisuje karakteristike hardvera ili softvera.

P

period – vrijeme ponavljanja signala.

pojačanje napona – broj koji pokazuje koliko je puta izlazni napon veći od ulaznog napona; na sličan način definiše se pojačanje struje i snage.

polučelija filtra – električno kolo čijim se povezivanjem dobijaju filtarske ćelije.

poludupleks – tehnika prenosa signala u oba pravca u različitim vremenskim trenucima.

površinski talas – EMT koji se prostire površinom Zemlje, prateći pri tome njenu zakrivljenost.

PPF – pojasnopropusni filter, filter koji propušta opseg frekvencija od donje do gornje granične frekvencije.

preambula – niz bitova na početku i kraju prenosnog okvira kojim se vrši sinhronizacija rada predajnika i prijemnika.

predajnik – uređaj u kojem se poruka pretvara u signal pogodan za prenos.

preslušavanje – pojava miješanja signala iz različitih vodova u telefoniji.

prijemnik – uređaj koji obavlja operaciju inverznu onoj u predajniku: transformiše primljeni električni signal u poruku identičnu onoj koja je nastala na izlazu iz izvora poruke.

pristupna tačka – uređaj ili algoritam koji omogućuje spajanje dva ili više uređaja.

propusni opseg sistema – širina intervala učestanosti komunikacijskog kanala između predajne i prijemne strane sistema.

propusnost – broj bita koji se mrežom mogu prenijeti u posmatranom vremenu.

protokol – skup pravila ili standarda definisanih da omoguće računarima međusobno povezivanje radi razmjene informacija.

R

radio-difuzija – prenos signala od jednog predajnika ka velikom broju prijemnika, radio-putem pomoću radio-talasa.

refleksija – pojava odbijanja elektromagnetnog talasa, kada talas na putu kroz slobodan prostor naiđe na neku prepreku.

refrakcija – pojava koja nastaje pri prelazu elektromagnetnog talasa između dvije sredine različitih gustina.

repetitor – uređaj koji se u komunikacionim kolima koristi za pojačavanje ili regenerisanje signala, tako da se signal može poslati na veću udaljenost sa svojom prvobitnom snagom i u prvobitnom obliku.

S

servisi – vrste telekomunikacionih usluga.

signal – bilo koja električna veličina, kao što su napon, struja ili učestanost, koja može da se koristi za prenos informacija:

- analogni – signali koji se kontinualno mijenjaju u vremenu
- aperiodični – signali koji se ne ponavljaju u istom obliku poslije određenog vremena
- binarni – signali koji imaju dva stanja, obično se označavaju kao stanje logičke jedinice i logičke nule
- determinisani – signali koji se mogu definisati vremenskom funkcijom
- digitalni – signali koji imaju konačan broj stanja

- periodični – signali koji se ponavljaju u istom obliku nakon određenog vremena
- slučajni – signali koji se ne mogu predvidjeti, i kojima ne možemo znati vrijednost prije nego što se generišu.

signal nosilac – pomoćni signal kojim se vrši modulacija, odnosno prenos signala u transponovani opseg.

simpleks – tehnika prenosa signala samo u jednom smjeru.

sinhroni prenos – tehnika prenosa podataka gdje su znaci razdvojeni fiksnim vremenskim intervalima.

slabljenje napona – broj koji pokazuje koliko je puta ulazni napon veći od izlaznog napona, predstavlja recipročnu vrijednost od pojačanja napona.

spektar signala – frekvencijski opseg signala.

Sputnjik – prvi vještački satelit; lansirao ga je SSSR 1957. godine.

standard – javno dostupan dokument koji je donio nadležni organ; njime se utvrđuju propisi, zahtjevi, karakteristike i uputstva koja uređuju određenu oblast.

Š

šum – neželjeni električni signal, generisan prirodnim putem ili pomoću električnih kola, koji pogoršava karakteristike komunikacionog kanala:

- ambijentalni – šum prostorije u kojoj se govori i koji se transformacijom preko mikrofona prenosi u telekomunikacioni sistem
- bijeli – šum ravnomjerno raspodijeljen u spektru
- intermodulacioni – šum koji se javlja pri prenosu signala različitih frekvencija istim prenosnim medijumom
- termički – pojava koja je svojstvena svim sistemima čija je apsolutna temperatura (T) veća od 0 °K
- šum kvantizacije – šum koji se javlja usljed greške kvantizacije
- šum preslušavanja – šum koji nastaje zbog elektromagnetne sprege između susjednih bakarnih kablova kojim se prenose informacije.

T

talas – bilo koji poremećaj ili promjena koji imaju oscilatornu, periodičnu prirodu; na primjer, zvučni ili elektromagnetni talas.

talasna dužina – rastojanje, izraženo u metrima, koje talas pređe u jednoj oscilaciji.

talasovod – medijum koji provodi elektromagnetne talase uz minimalan gubitak energije, u jednom smjeru; realizuju se kao šuplje provodne metalne cijevi ili trake.

telekomunikacije – emitovanje, prenos ili prijem poruka u vidu signala, korišćenjem žičnih, radio, optičkih ili drugih sistema prenosa.

totalna refleksija – pojava potpunog odbijanja svjetlosti, koja iz optički gušće sredine pada na granicu s optički rjeđom sredinom, pa se od nje potpuno odbija ili reflektuje.

transponder – primopredajnik na komunikacionom satelitu koji prima signal sa zemaljske stanice i ponovo ga šalje na različitoj učestanosti ka jednoj zemaljskoj stanici ili ka više njih.

transponovani opseg – opseg viših frekvencija.

U

unicast – način komunikacije kada se poruka prenosi od predajnika do samo jedne prijemne stanice.

upredena parica – dvije izolovane žice, najčešće napravljene od bakra i međusobno spiralno isprepletene.

USB kabl – univerzalni kabl za serijski prenos podataka.

8. Literatura

1. I. S. Stojanović: *Osnovi telekomunikacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1977.
2. M. Filipović: *Osnove telekomunikacija za II razred elektrotehničke škole*, ISBN 86-17-09225-4, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
3. M. Dukić: *Principi telekomunikacija*, Akademska misao, Beograd, 2014.
4. A. Tanenbaum: *Računarske mreže*, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Mikro knjige, Beograd, 2005.
5. W. Shay: *Komunikacione tehnologije i mreže*, autorizovani prevod sa engleskog jezika u izdanju Kompjuterske biblioteke, Čačak, 2004.
6. *Understanding Telecommunication*, Ericsson Telecom, Telia and Studentlitteratur, 2001.
7. B. Williams, S. Sawyer: *Using Information Technology*, Mc Graw Hill, New York, 2014.
8. R. Vojinović, R. Božović: *Osnove elektronike za I razred elektrotehničke škole*, ISBN 978-86-303-2368-3, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Podgorica, 2020.
9. G. Marković: *Telekomunikacije II*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2020.
10. M. Duck, R. Read: *Data Communications and Computer Networks*, Pearson Education Limited, Ann Arbor (USA), 2003.
11. I. Klajn, M. Šipka: *Veliki rečnik stranih reči i izraza*, Prometej, Novi Sad, 2006.
12. *Računarski rečnik*, Microsoft Press, ISBN 86-7991-066-x, CET Beograd, 1999.

9. Korišćene internetske stranice

(važće u 2022. godini)

1. www.ucg.ac.me/etf
2. www.telekomunikacije.etf.rs
3. es.elfak.ni.ac.rs
4. www.wikipedia.org
5. www.tutorialspoint.com/digital_communication
6. www.mathworks.com/
7. www.automatika.rs/
8. <http://msts-travnik.net/>
9. <https://dsp.etfbl.net/filtri/>
10. <http://megatrend.edu.rs/>
11. <https://www.rt-rk.uns.ac.rs/>
12. <https://www.grf.bg.ac.rs/>
13. <https://viser.edu.rs/>
14. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/>
15. <https://www.opensourceforu.com/>
16. <https://etf.unibl.org/>
17. <https://www.techtarget.com/>
18. <https://www.cisco.com/>
19. <https://www.juniper.net/>