

1. Temelji arhitekture mreža

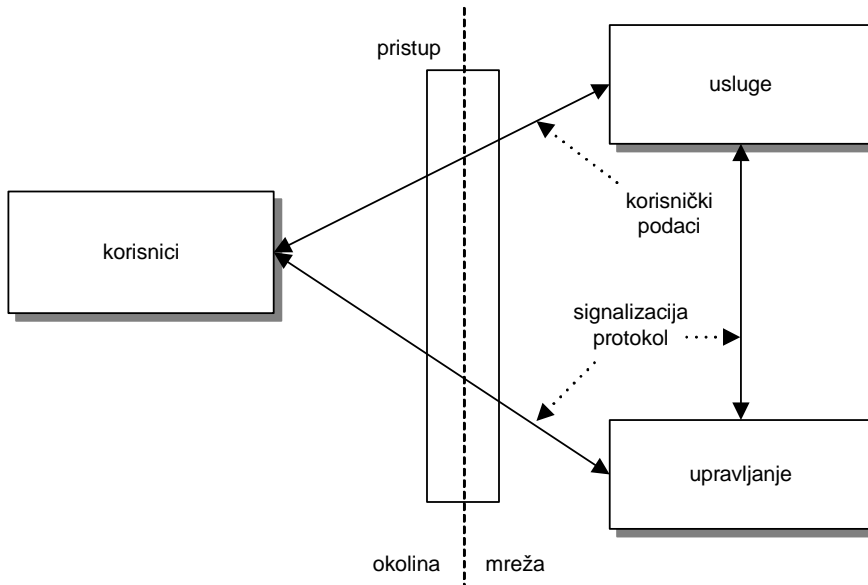
Polazeći od korisničke informacije, u ovom poglavlju daje se osnovna struktura mreže koja omogućuje uspješno vođenje informacijskih tokova od izvorišta do odredišta. Postavljaju se principi vrednovanja informacije i granice sigurnog prijenosa. Općenita informacijska jedinica smješta se u informacijski prostor, što omogućuje višestruko iskorištenje fizičkog sloja mreže. Prikazani su principi usmjeravanja tokova informacijskih jedinica kroz mrežu i postavljeni kriteriji za vrednovanje kvalitete mreže. Prikazani temelji podrobnije se razrađuju u poglavljima koja slijede.

1.1. Korisnici i mreža

Pri analizi procesa koji se zbivaju u informacijskim mrežama, potrebno je razmatrati raznorodne pojave koje se zbivaju u interakciji korisnika i mreže.

Razmatramo tri sudioničke strane pri uspostavi poziva odnosno usluge (Sl. 1.1): korisnici, usluge i upravljanje. Korisnici iz okoline pristupaju u mrežu preko pristupnog dijela u kojem se obavljaju sve potrebne transformacije oblika informacija. Upravljujuće informacije razmjenjuju se između korisnika i upravljujućeg dijela mreže i između uslužnog i upravljujućeg dijela mreže posredstvom određenog signalizacijskog sustava i pripadajućeg protokola. Korisnik inicira poziv ili uslugu, što upravljanje nakon određenog kašnjenja prihvaća, te nakon obrade pripadajućih upravljujućih informacija stavlja korisniku na raspolaganje tražene resurse uslužnog dijela mreže. Za vrijeme uporabe resursa upravljujući dio nadgleda uvjete korištenja kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta usluge. Po završetku poziva, odnosno usluge, koju opet inicira korisnik, provodi se obrada raskidanja veze, čiji je rezultat oslobađanje zauzetih resursa i naplaćivanje usluge.

Kada se radi o brzim ATM mrežama, obrazloženi osnovni princip upravljanja mora se spustiti na mnogo niže razine no što je to razina poziva i usluge. Budući da su ćelije u ATM mrežama samostalne informacijske jedinice s vlastitim adresama, očito je da upravljanje praktički mora doprijeti do razine ćelija.



Sl. 1.1 Sudionici pri uspostavi poziva

Veze se moraju razložiti na pojave koje se događaju unutar komunikacije. Sve te pojave imaju slučajni karakter. Svaka se veza sastoji od izvjesnog broja dijaloga između kojih su periodi tišine. Unutar svakog dijaloga informacije teku usnopljeno, a između snopova su opet praznine. Svaki se snop informacija prikazuje tokom ćelija koje mogu imati serijski ili paralelno-serijski slijed.

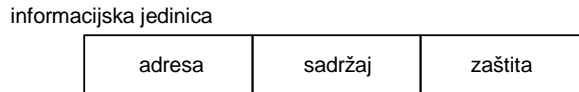
Takvo se razlaganje koristi pri dimenzioniranju potrebnih kapaciteta resursa uslužnog dijela mreže. Kako su manipulacije ćelijama brze pojave, njima se mora prilagoditi i sustav upravljanja.

Napredne arhitekture mreže primjenjivat će posve drukčiju organizaciju poziva i usluga u odnosu na postojeće. Prije svega je potrebno načiniti detaljnu granulaciju procesa koji se zbivaju nakon što korisnik zatraži poziv ili uslugu od mreže. Prometna jedinica više ne može biti poziv ili usluga, već se treba spustiti na niže razine: svaki se poziv/usluga sastoji od određenog broja zahtjeva za obradu u procesorskom sustavu, zahtjev se sastoji od određenoga broja elementarnih poslova, koji se dalje kombiniraju u serijsko paralelne strukture s odlikama visokog i niskog paralelizma.

Informacijske mreže postaju sve složenije. Vrste informacija koje teku mrežama pripadaju različitim medijima, tako da govorimo o višemedijskim uslugama. Pristup uslugama nije samo stacionaran i žični, već se uvode pokretni i bežični pristupi.

1.2. Općeniti model informacijske mreže

Informacijska je mreža skup sklopovskih i programskih elemenata koji obavljaju operacije transmisije, komutacije i procesiranja, a međusobnim fiksnim ili varijabilnim vezama tvore konfiguracije sredstava namijenjenih korisnicima za obavljanje traženih informacijskih usluga [SINKOVIĆ, V. 1994.]. Operacije se izvode na informacijskim jedinicama koje u općem slučaju imaju strukturu (adresa, sadržaj, zaštita) kao na Sl. 1.2, a u vremenskom razvoju tvore informacijski tok.



Sl. 1.2 Struktura informacijske jedinice

Navedene tri vrste operacija možemo pobliže opisati ovako:

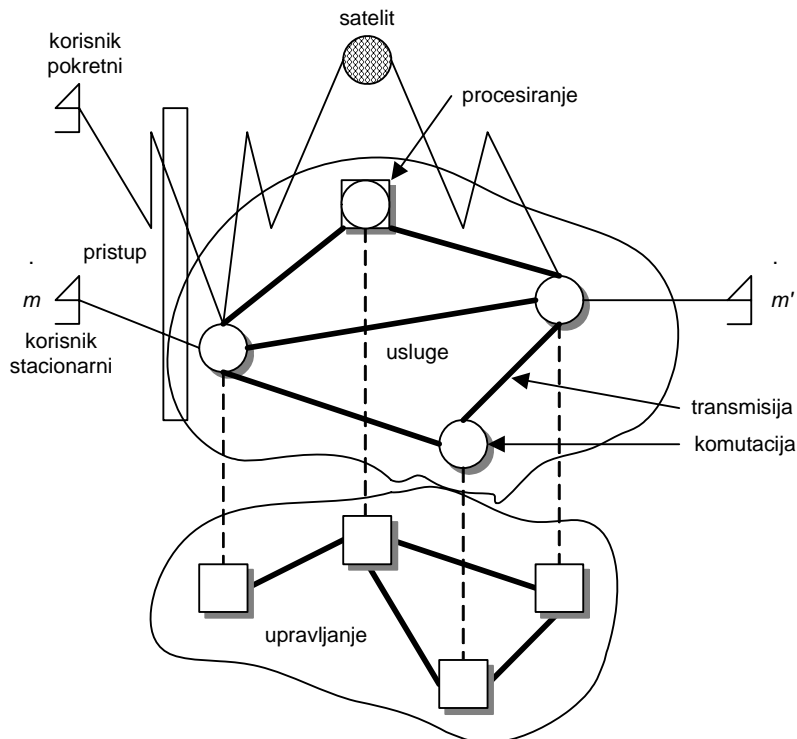
- transmisija je premještanje određene količine informacija između određenih točaka informacijskog prostora;
- komutacija je usmjeravanje informacijskih jedinica na određene prienosne puteve koji povezuju točke informacijskog prostora;
- procesiranje je procesorsko izvođenje određenih algoritama označenih programskim jezikom, pri čemu se mijenja sadržaj informacijskih jedinica.

Spomenute operacije mogu se primijeniti na izvorne (korisničke) i na upravljajuće informacije.

Tri bitna dijela mreže; korisnički dio, posluživanje i upravljanje, možemo prikazati kao na Sl. 1.3:

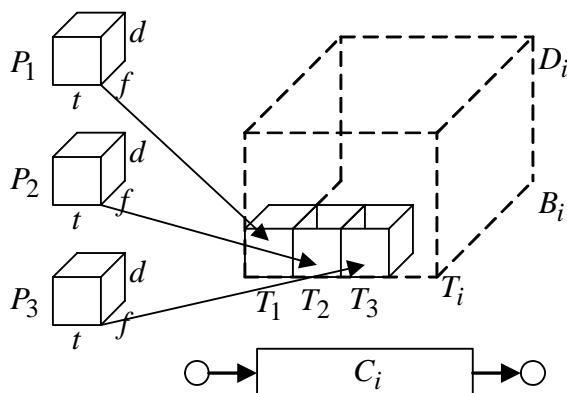
- korisnički dio služi za prikupljanje i predaju informacija korisnicima posredstvom terminalnih uređaja. Ovisno o vrsti korisnika i njihovih zahtjeva za obavljanje određene usluge, postavljaju se odgovarajući kriteriji kvalitete koje informacijska mreža mora u cijelosti zadovoljiti;
- dio za posluživanje namijenjen je obavljanju traženih usluga, tj. provođenju operacija transmisije, komutacije i procesiranja. Općenito se sastoji od N čvorova koji služe za prikupljanje, pohranu, usmjeravanje i obradu informacijskih tokova. Čvorovi su informacijski povezani posredstvom M transmisijskih grana koje obavljaju operaciju transmisije informacijskih tokova između čvorova. Dio za posluživanje je, dakle, skup sklopovskih i programskih sredstava koja se stavljaju na raspolaganje korisnicima za izvršenje traženih informacijskih usluga;
- upravljački dio namijenjen je upravljanju usmjeravanjem informacijskih tokova u skladu s postavljenim kriterijima kvalitete uz osiguranje obavljanja tražene usluge za svakog korisnika. Zbog toga su čvorištima pridruženi upravljajući procesorski sustavi koji su međusobno povezani

posebnim signalizacijskim kanalima. Neke od mreža imaju protokole koji nemaju razdvojeni uslužni i upravljački dio.



Sl. 1.3 Struktura mreže

Za obavljanje bilo koje operacije nad informacijskom jedinicom, potrebno je potrošiti odgovarajući informacijski volumen elementa koji izvodi operaciju. Promatramo neki i -ti element kao dio informacijske mreže (Sl. 1.4). Njegove fizikalne karakteristike; frekvencija (B), vrijeme (T) i dinamika (D) određuju mu u smislu teorije informacije informacijski volumen $H_i = B_i D_i T_i = C_i T_i$. Svaka informacijska jedinica koja prolazi razmatranim elementom troši za obavljanje tražene usluge dio informacijskog volumena jednak $H_s = C_s t_s$. Za svaki element mreže također mora biti zadovoljen uvjet: $\sum_{s=1}^{n_i} C_s t_s \leq C_i T_i$, gdje je n_i broj informacijskih jedinica koje su pristigle na element mreže u razmatranom vremenu T_i . Radi ilustracije, na Sl. 1.4 gornja smo razmatranja prikazali pomoću geometrijske interpretacije u informacijskom volumenu B , T , D .



Sl. 1.4 Informacijski volumen

Informacijska je mreža prostorno distribuirana struktura, pa indeks i kojim smo označili i -ti element možemo ujedno smatrati oznakom prostora. Tako za svaku operaciju koja se obavlja nad nekom informacijskom jedinicom u mreži, možemo označiti mjesto gdje se ta operacija provodi, pomoću adrese $\{A\}$ koja se sastoji od četiriju koordinata: prostor p , vrijeme t , frekvencija f i dinamika d : $\{A\} = \{p, t, f, d\}$. Ukupni informacijski volumen mreže dobivamo zbrajanjem informacijskih volumena svih elemenata: $H_m = \sum_{M,N} C_i T_i = CT$.

Ukupni informacijski volumen mreže potencijalna je sposobnost informacijske mreže da obavlja određene operacije. Način obavljanja tih operacija na najpovoljniji način bit će predmet daljnjih razmatranja.

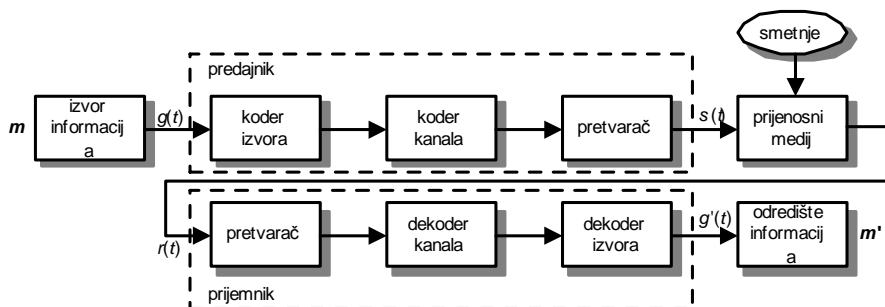
Općenito postavljen model informacijske mreže pojednostavnit ćemo tako da se za adresiranje mjesta izvođenja pojedinih operacija ne uzimaju sve četiri navedene koordinate kao promjenjive, imajući u vidu tehničku izvedbu stvarnih elemenata informacijske mreže. Primjenjivana tehnika i tehnologija daje prednost prostorno-vremenskim sustavima uz konstantne dimenzije frekvencije i dinamike. Tako se adrese za označavanje mjesta obavljanja pojedinih operacija sastoje samo od dviju koordinata $\{A\} = \{p, t\}$. Pritom je pogodno da sve informacije imaju digitalni oblik i da se sve operacije provode u prostorno-vremenskim koordinatama. Za bilo koji i -ti element mreže, kapacitet C_i razmatramo kao maksimalnu brzinu, izraženu u bitima u sekundi, kojom on može obavljati zadanu operaciju. Stvarni protok informacije kroz razmatrani element dan je ograničenjem: $0 \leq f_i \leq C_i$, gdje je s f_i označen informacijski tok kroz i -ti element.

1.3. Komunikacijski kanal

Iz općenitog prikaza informacijske mreže izdvojimo komunikaciju između dviju točaka; m – izvor i m' odredište. Problem komunikacije možemo definirati ovako:

FUNDAMENTALNI PROBLEM KOMUNIKACIJE JE TOČNO ILI APROKSIMATIVNO REPRODUCIRATI NA JEDNOJ TOČKI INFORMACIJSKOG PROSTORA (ODREDIŠTE, m') PORUKU ODABRANU NA NEKOJ DRUGOJ TOČKI (IZVOR, m).

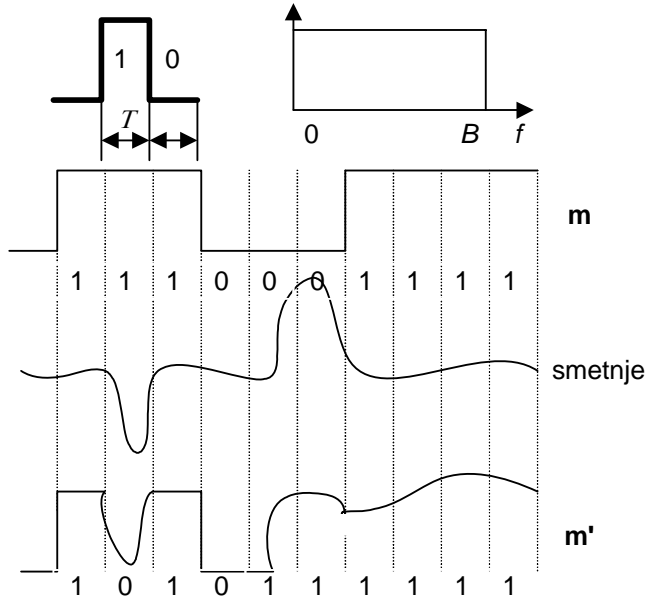
Promatrajmo digitalni oblik komunikacije (Stallings [1999]) i opišimo elemente koji sudjeluju u komunikaciji (Sl. 1.5).



Sl. 1.5 Komunikacija između izvora i odredišta

Na početku prijenosnog lanca u modelu digitalnog komunikacijskog sustava nalazi se informacijski izvor koji generira ograničeni skup simbola. Zadatak je koder izvora da taj skup simbola pretvori u oblik pogodan za prijenos i obradu. Na primjer, ako je izvor informacije terminal, tada on generira alfanumeričke znakove, a zadatak je koder izvora da ih pretvori u binarne kodne riječi (*code word*) sukladno 7-bitnom kodu ASCII. U pravilu je kôd izvora binaran i sve kodne riječi imaju jednaku duljinu. Nadalje, koder kanala preuzima formirane kodne riječi i dodaje im sistematsku zalihost koja u prijemu omogućuje raspoznavanje pogrešaka nastalih uslijed djelovanja smetnji, te, ovisno o vrsti primijenjenog koda, omogućuje i ispravljanje pogrešaka (neke vrste zaštitnih kodova, kao na primjer dodavanje paritetnog bita, ne omogućuju ispravljanje pogrešaka, već samo njihovo otkrivanje). Zadatak je pretvarača da izlaz iz koder izvora pripremi za prijenos medijem. U tu se svrhu u pretvaraču koriste modulacijski postupci (signal na mediju je analogan) ili linijsko kodiranje (signal na mediju je digitalan). Dakle, pretvarač pretvara primljene kodne riječi u simbole koji mogu biti analogni ili digitalni. Slijed analognih simbola naziva se valni oblik (*waveform*). Osnovna namjena podatkovne komunikacije je razmjena informacija između dvaju sudionika (izvora i odredišta). Informacija je zapravo značenje koje ljudi pridaju podacima, koristeći pritom određena pravila koja se na te podatke primjenjuju. Podaci su prikaz činjenica, koncepata

ili naredbi na formalizirani način koji je pogodan za komunikaciju, tumačenje i obradu koje obavljaju ljudi ili računala. Signal predstavlja fizikalni prikaz podataka (na primjer, napon čija se amplituda mijenja u vremenu, a dinamika promjena određena je podacima).



Sl. 1.6 Binarni signali

U digitalnom prijenosu javlja se pitanje: “Do koje mjere izobličenja i smetnje ograničavaju brzinu koju je moguće postići u kanalu prijenosa?” Maksimalna brzina kojom je moguće prenositi podatke određenim komunikacijskim kanalom u danim uvjetima naziva se kapacitet kanala (*channel capacity*). Prvu formulu za kapacitet kanala definirao je Nyquist (Haykin [2001]), i to za sljedeći model sustava. Na ulaz kanala koji ima karakteristiku idealnog niskopropusnog filtra granične frekvencije B (u području od 0 Hz do B Hz ne prigušuje signal, a izvan tog područja apsolutno prigušuje signal) dovode se diskretni uzorci signala. Pitanje je: “Kolika je najveća brzina kojom je moguće dovoditi uzorke, a da na izlazu takvog kanala vrijednosti signala u trenucima uzimanja uzoraka budu nepromijenjene?” Kroz gore definirani kanal moguće je slati najviše $2B$ bita u jedinici vremena. Svaki uzorak na ulazu kanala prenosi jedan bit informacije (definirane su dvije naponske razine po uzorku, jedna za logičku nulu i druga za logičku jedinicu). Ako se radi o M -narnom prijenosnom sustavu, tada svaki uzorak prenosi $\log_2 M$ bita informacije, a svaki uzorak može poprimiti jednu od M naponskih razina. Dakle, u M -narnom sustavu maksimalna brzina slanja kroz kanal iznosi $2B \log_2 M$ bita u jedinici vremena. Međutim, Nyquist nije uzeo u obzir djelovanje smetnji, odnosno razinu šuma koja dodatno ograničava kapacitet. Ako šum ne uzmemo u razmatranje, tada

1. Temelji arhitekture mreža

broj naponskih razina po uzorku signala može biti teoretski beskonačan, pa samim tim i ne postoji ograničenje na kapacitet kanala. Shannon je definirao konačnu formulu za kapacitet kanala koja uračunava i djelovanje smetnji:

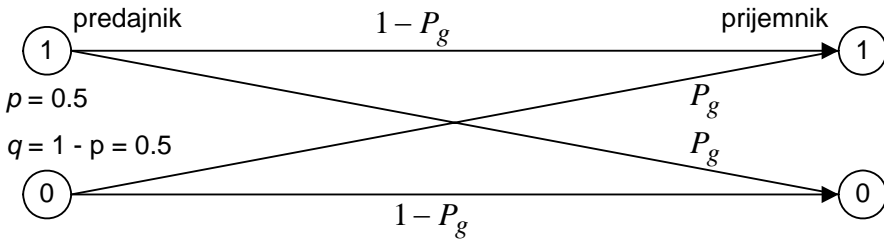
$$C = B \log_2(1 + S/N) = 2B \log_2 \sqrt{1 + S/N} = 2BD \quad [\text{bit} / \text{s}],$$

gdje je s $D = \log_2 \sqrt{1 + S/N}$ označena dinamika sustava.

Iz gornje je formule vidljivo da upravo odnos snage signala i snage smetnje (S/N) ograničava broj mogućih diskretnih naponskih razina po uzorku signala.

Za digitalne sustave primjenjuju se signali s dvjema razinama, pa smetnje u toku prijenosa djeluju tako da se signal koji odgovara simbolu "1" pretvori u simbol "0" i obrnuto, signal koji odgovara simbolu "0" pretvori se u simbol "1". To je ilustrirano na Sl. 1.6. [SINKOVIĆ, V. 1997.].

Djelovanje smetnji možemo izraziti vjerojatnošću pretvorbe predane "1" u primljenu "0" ili "0" u "1", koju označavamo s P_g . Ta je vjerojatnost u funkcijskoj vezi sa snagom smetnji, tj. s odnosom S/N . Ograničenje frekvencijskog spektra na širinu B dodatno izobličuje signal na prijemu. Tako dobivamo model binarnog simetričnog kanala čija je shema prijenosa prikazana na Sl. 1.7.



Sl. 1.7 Binarni simetrični kanal

Kapacitet takvoga kanala može se izraziti samo veličinom vjerojatnosti pogreške P_g , i iznosi:

$$C = \frac{1}{T} [1 + P_g \log_2 P_g + (1 - P_g) \log_2 (1 - P_g)] [\text{bit} / \text{s}].$$

Taj je izraz dobiven pod pretpostavkom ravnomjernog pojavljivanja simbola na izvoru $p = q = 0.5$. Maksimalni kapacitet bit će postignut kada nema smetnji, tj.

$P_g = 0$, i iznositi će $C = \frac{1}{T} = 2B [\text{bit} / \text{s}]$, a to se podudara s Nyquistovom formulom.

Veličina $C_1 = CT = 1 - H_2(P_g)$, gdje koristimo skraćenu oznaku $H_2(x) = -x \log_2 x - (1-x) \log_2 (1-x)$, pokazuje koliko se informacijskih bita

maksimalno može prenijeti u jednom kanalskom bitu uz po volji malu pogrešku nakon dekodiranja. Ta će nam veličina poslužiti za ocjenu kvalitete sigurnosnih kodova.

1.3.1. Kodiranje na izvoru

Ekonomičnost sigurnog prijenosa informacije postavlja zahtjev da se što manjim brojem kanalskih bita prenese što je moguće veći broj informacijskih bita. To znači da se prikaz izvornih informacija kôdom mora dovesti u vezu sa stvarnim sadržajem informacije na izvoru [SINKOVIĆ, V. 1997.].

Promatramo skup izvornih informacija i vjerojatnosti njihova pojavljivanja:

$$U = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}, \quad p(U) = \{p(u_0), p(u_1), \dots, p(u_{N-1})\}, \quad \sum_{i=0}^{N-1} p(u_i) = 1.$$

Prosječna količina informacije takvoga skupa određuje se entropijom skupa:

$$H(U) = - \sum_{i=0}^{N-1} p(u_i) \log_2 p(u_i) = H(p).$$

Ekonomično kodiranje na izvoru postiže se tako da prosječna duljina kodne riječi \bar{b} bude što je moguće bliža entropiji izvora, što se za binarni kod izražava relacijom: $H(p) \leq \bar{b} \leq H(p) + 1$. To će se postići ako vijestima s većom vjerojatnosti pojavljivanja pridružimo kraću kodnu riječ, pri čemu kôd mora biti reverzibilan, što se postiže ako je zadovoljen uvjet: $\sum_{i=0}^{N-1} 2^{-b_i} \leq 1$, gdje je b_i duljina i -te kodne riječi.

Praktičke izvedbe kodiranja na izvoru više ili manje uzimaju u obzir postavljene optimalne odnose, pa tako za pojedine vrste informacija dobivamo određene brzine prijenosa.

Najjednostavnije kodiranje na izvoru primjenjuje se u prijenosu podataka gdje se ne uzima u obzir statistika pojavljivanja izvornih vijesti. Svaki znak se kodira kodnom riječi fiksne duljine, a koriste se kodovi ASCII i EBCDIC (IBM).

Jedna od starijih metoda kodiranja govora je PCM (Pulse Code Modulation), koja govorni signal, čija širina spektra iznosi 4 kHz, kodira brzinom od 64 kbit/s (Couch [2001]). U mnogim paketskim mrežama poželjno je kodirati govor manjom brzinom pa je ITU-T donio nekoliko takvih standarda. Za prijenos govora brzinom između 16 kbit/s i 48 kbit/s koristi se ADPCM (Adaptive Differential PCM), za prijenosnu brzinu 16 kbit/s LD-CELP (Low-delay Code Excited Linear Prediction), a za brzinu 8 kbit/s CS-ACELP (Conjugate-structure Algebraic Code-excited Linear Prediction). Preporukom G.723.1 definirane su i niže brzine kodiranja govora: 5,3 kbit/s i 6,3 kbit/s.

U području audija postoje dva raširena standarda. ITU-T G.722 i G.725 definiraju kodiranje audija širine spektra 7 kHz brzinom do 64 kbit/s, a MPEG-3 (Motion Picture Expert Group) definira kodiranje audija varijabilnom brzinom. Kodiranje izvora modulacijskim postupcima kao što su PCM i ADPCM, predstavlja temelj usluge prijenosa stalnom brzinom (CBR - Constant Bit Rate), dok na kodiranju kodom MPEG počiva koncept prijenosa promjenjivom brzinom (VBR - Variable Bit Rate).

U kodiranju videa treba razlikovati kodiranje videa malom brzinom (na primjer za videokonferencije, ITU-T H.261 i H.263) i kodiranje videa velikom brzinom (na primjer, kodiranje HDTV signala brzinom i do 60 Mbit/s pomoću standarda MPEG-2). Standard MPEG-1 definira kodiranje pohranjenog pokretnog videa (*stored motion video*) brzinom do 2 Mbit/s, a MPEG-4 kodiranje videa brzinom manjom od 64 kbit/s. Stariji standard JPEG (Joint Photographic Experts Group) koristi se za kodiranje mirne grafike u multimedijском okruženju.

1.3.2. Granice sigurnog prijenosa informacija

Kapacitet kanala jest i mjera za mogućnost sigurnog prijenosa izvornih informacija. Zbog analize tih mogućnosti uvedimo kodni omjer kao omjer broja bita kojima se kodira izvorna informacija prema broju prijenosnih bita u kanalu, kako slijedi:

$$F = \frac{\text{broj informacijskih bita}}{\text{broj kanalskih bita}},$$

a on pokazuje koliko se informacijskih bita prenosi u jednom kanalskom bitu pomoću stvarno primijenjenog koda. Potom možemo analizirati mogućnosti zaštite informacije, promatrajući ovisnost vjerojatnosti pogreške nakon dekodiranja u prijemniku P_e o kodnom omjeru F u ravnini $\{P_e, F\}$. P_e se podudara s osi apscise za vrijednosti $0 < F \leq C_1$. Nakon toga vrijedi relacija:

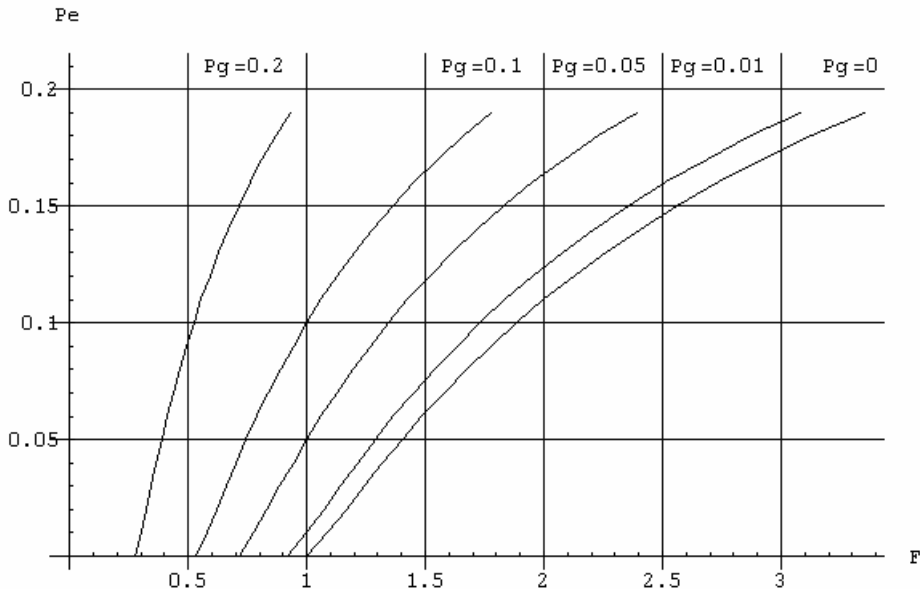
$$F = \frac{1 - H_2(P_g)}{1 - H_2(P_e)}, \quad F > C_1,$$

što je prikazano na Sl. 1.8 za različite vrijednosti vjerojatnosti pogreške bita u kanalu P_g . Prema tome, ako je $0 < F \leq C_1$, vjerojatnost pogreške P_e može se po volji približiti nuli ovisno o primijenjenom zaštitnom kodu. U području $C_1 < F \leq 1$ može se postići vjerojatnost pogreške P_e u granicama $0 < P_e \leq P_g$, a za područje $F > 1$ vjerojatnost pogreške nakon dekodiranja se povećava $P_e > P_g$.

Opći je zaključak da za učinkovitu zaštitu izvornih informacija mora biti zadovoljena relacija:

$$\text{broj kanalskih bita} > \frac{\text{broj informacijskih bita}}{C_1}$$

Ova razmatranja pokazuju granične mogućnosti zaštite informacije, a izbor konkretnog zaštitnog koda dat će veće ili manje približavanje tim graničnim mogućnostima.



Sl. 1.8 Vjerojatnost preostale pogreške

1.3.3. Upravljanje pogreškama

Praktična zaštita provodi se tako da se ulazne informacije grupiraju u okvire nad kojima se potom provodi zaštita koja omogućuje upravljanje pogreškama. Upravljanje pogreškama (*error control*) [GRAVANO, S. 2001.] obuhvaća mehanizme za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka koje nastaju za vrijeme prijenosa podatkovnih okvira od izvora do odredišta. Postoje dvije vrste pogrešaka u prijenosu, uslijed kojih nastaju:

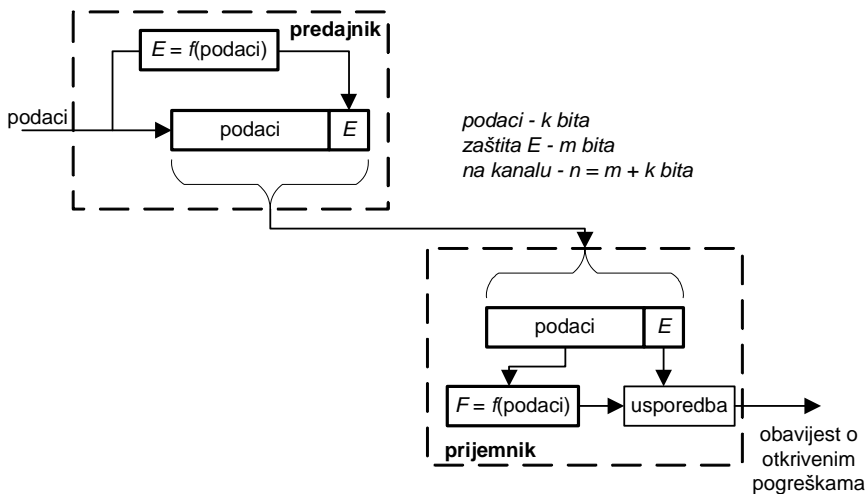
- **izgubljeni okvir** (*lost frame*) - podatkovni okvir koji ne stiže na odredište. Na primjer, uslijed velikog snopa smetnji okvir se izobliči na takav način da ga prijemnik na odredištu uopće ne može raspoznati kao ispravan podatkovni okvir;

- **oštećeni okvir** (*damaged frame*) - u prijemnik dolazi raspoznatljivi podatkovni okvir, ali su neki od njegovih bita pogrešni, tj. originalna vrijednost tih bita je promijenjena u prijenosu uslijed djelovanja smetnji.

Metode za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka moguće je podijeliti u dvije osnovne skupine (Tanebaum [1996]):

- BEC (Backward Error Correction) - otkrivanje pogrešaka u prijemniku nakon koje slijedi retransmisija pogrešno primljenog okvira;
- FEC (Forward Error Control) - ispravljanje pogrešaka u prijemniku.

Ako kod primjene BEC-a prijemnik na određitu otkrije pogrešku, on o tome obavještava izvor. Izvor zatim mora ponoviti slanje okvira koji su na određitu primljeni s pogreškama. Postoji nekoliko takvih mehanizama, a zajednički im je naziv ARQ (Automatic Repeat Request), tj. zahtjev za automatskim ponavljanjem neispravnih okvira. Na linku koji koristi metodu FEC za upravljanje pogreškama, prijemnik otkriva pogreške i ujedno ih ispravlja. Primjena FEC-a iziskuje da se podaci u okvirima štite zaštitnim kodovima (*error correction code*) koji omogućuju ispravljanje pogrešaka (npr. Hammingov kod, BCH kodovi, konvolucijski kodovi, Reed-Solomonovi kodovi i dr.). FEC bitno smanjuje broj retransmisija na linku, ali se BEC češće koristi zbog jednostavnije i jeftinije implementacije.



Sl. 1.9 Načelo otkrivanja pogrešaka

Vjerojatnost da okvir primljen na određitu ne sadrži pogreške, tj. bitove koji su na prijenosnom putu promijenili vrijednost iz originalne ispravne u suprotnu neispravnu, opada s porastom vjerojatnosti pogreške na jednom bitu (*single bit error*). Ako je vjerojatnost nastupa pogreške na jednom bitu P_g , tada vjerojatnost da primljeni okvir ne sadrži pogreške iznosi $P_0 = (1 - P_g)^n$, pri

čemu je n broj bita u okviru. Dakle, s porastom duljine okvira smanjuje se i vjerojatnost da primljeni okvir ne sadrži pogreške. Omjer broja bita koji su primljeni s pogrešnom vrijednošću prema ukupnom broju primljenih bita naziva se BER (*bit error rate*).

Osnovno načelo na kojem se temelji djelovanje metoda za otkrivanje pogrešaka prikazano je na Sl. 1.9. Za dani podatkovni okvir predajnik pomoću funkcije zaštitnog kodiranja f proračunava zaštitni slijed bita E kojeg zatim dodaje podatkovnom okviru. Prijemnik na određitu najprije razdvaja primljene podatke od zaštitnog slijeda E . Zatim pomoću funkcije f (ista kao i u predajniku), iz primljenih podataka proračunava zaštitni slijed Z i uspoređuje ga s primljenim zaštitnim slijedom E . Ako vrijedi $Z = E$, tada prijemnik pretpostavlja da u prijenosu nije bilo pogrešaka.

Međutim, ponekad u prijenosu može nastupiti takva kombinacija pogrešaka da će u prijemniku vrijediti $Z = E$ unatoč činjenici da nekolicina bita u prijemu ima pogrešnu vrijednost. Ako je pak $Z \neq E$, tada je sigurno da je barem na jednom od bita nastupila pogreška. Situacija se dodatno komplicira ako pogreška u prijenosu nastane na nekom od bita koji tvore zaštitni slijed E .

Osnovnu zamisao možemo opisati sljedećim riječima: koder u predajniku prihvaća od izvorišta informacije k informacijskih simbola i dodaje im m zaštitnih simbola koji su izvedeni iz izvorišnih u suglasju s odabranim i dogovorenim pravilom kodiranja. Pravilo kodiranja određuje matematičku strukturu koda. Informacijski i paritetni simboli prenose se komunikacijskim kanalom kao blok (okvir) od $n = k + m$ simbola. Takav kod nazivamo (n, k) blok-kod. Radi jednostavnosti pristupa razmatrat ćemo binarne kodove, pa blok od n bita nazivamo kodni blok ili kodna riječ, a n je duljina bloka ili kodne riječi. Kodni omjer definiran za binarni sustav ima oblik $F = k/n$, a on zapravo pokazuje koliko se ulaznih binarnih simbola prenosi jednim binarnim simbolom nakon kodiranja.

Primljena riječ nakon prijenosa kanalom ne mora se, zbog mogućih pogrešaka, podudarati s predanom riječi, pa ćemo primljenu verziju jednostavno nazvati primljena riječ. Dekoder u prijemniku na osnovi primljene riječi određuje udovoljavaju li informacijski i kontrolni bitovi pravilima kodiranja i upotrebljava svako odstupanje za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka koje su se pojavile tijekom prijenosa. Dekoder prije svega izvodi ove funkcije:

- ponavlja pravila kodiranja na primljenoj riječi kako bi ustanovio jesu li udovoljene relacije paritetne kontrole. Odstupanja u paritetnim relacijama indiciraju prisutnost jedne ili više pogrešaka u primljenoj riječi. Ako se provodi samo otkrivanje pogreške, tada je rezultat ove kontrole objava da je primljena riječ pravilna ili pogrešna.

Ako provodimo i ispravljanje pogreške, tada slijede ova dva koraka:

1. Temelji arhitekture mreža

- odstupanje u kontroli upotrijebi se pri pronalaženju mjesta i oblika pogreške u primljenoj riječi. Za svaki kôd može postojati više algoritama za pronalaženje mjesta pogreške i to je obično najkompliciranija funkcija dekodera;
- kada je nađeno mjesto i oblik pogreške, ona se ispravlja, kontrolni simboli se odstranjuju iz kodne riječi, a dekodirani informacijski simboli predaju se odredištu.

Središnji je problem teorije kodiranja kako naći kôd za koji će se m ispitnih simbola što je moguće djelotvornije upotrijebiti za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka za neki zadani model kanala.

Kao primjer zaštitnog kodiranja uzmimo Hammingov kôd, gdje za zaštitu k informacijskih bitova mora biti zadovoljen uvjet $2^{n-k} \geq n+1$, odnosno $k \leq n - \log_2(n+1)$, $n = k + m$. Kodni je omjer $F = k/n$, a odnos među veličinama pokazan je sljedećom tablicom [SINKOVIĆ, V. 1994.]:

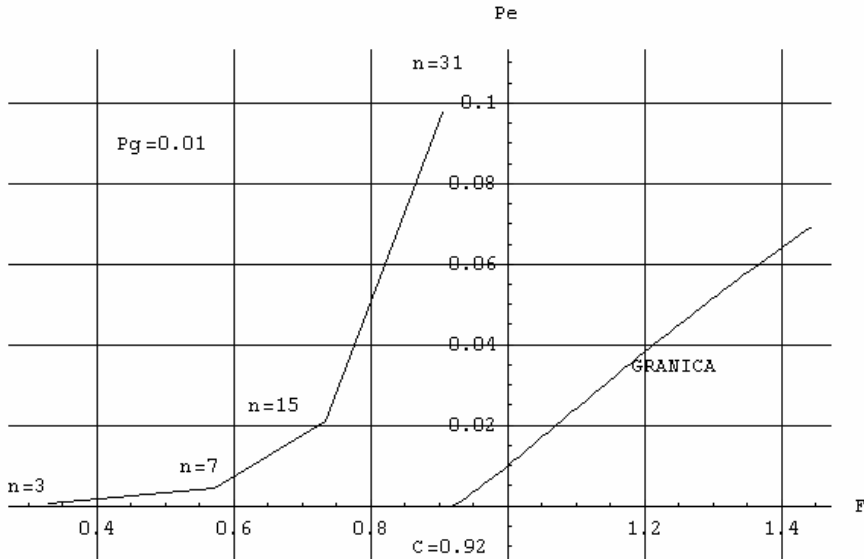
Tablica 1.1

k	0	1	4	11	26	57	...
m	1	2	3	4	5	6	...
$n=k+m$	1	3	7	15	31	63	...
$F=k/n$	0	0.333	0.571	0.733	0.839	0.905	...

Hammingov kod može ispraviti jednostruku pogrešku unutar bloka duljine n bita pa je vjerojatnost pojave pogreške koja se ne može ispraviti dana relacijom:

$$P_e = \sum_{i=2}^n \binom{n}{i} P_g^i (1 - P_g)^{n-i}.$$

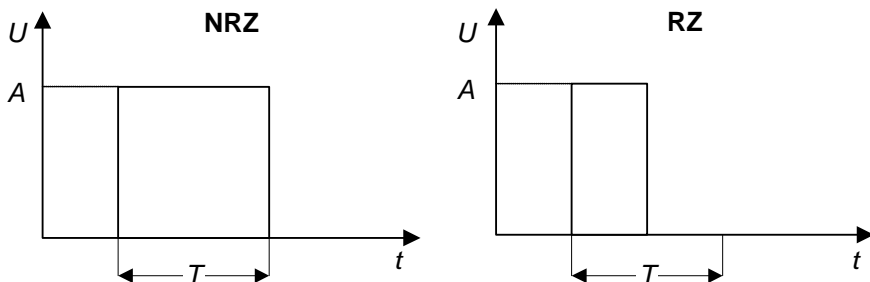
Povezujući zajedno sve parametre koji određuju zaštitno kodiranje, možemo načiniti analizu koristeći se dijagramom prema Sl. 1.10. Uz konstantni iznos vjerojatnosti pogreške bita $P_g = 0.01$, povećanjem duljine bloka n raste kodni omjer F , čime se približavamo graničnoj vrijednosti koja za ovaj primjer iznosi $C_1 = 0.92$. Međutim, s druge strane, povećanje duljine bloka povećava vjerojatnost pogreške P_e koju primijenjeni kod ne može otkriti niti ispraviti. Teoretska granica koja je općenito postavljena razmatranjima na Sl. 1.10 daleko je od mogućnosti ovoga koda. Izborom različitih vrsta sigurnosnih kodova možemo se po volji približiti teoretskoj granici.



Sl. 1.10 Pogreška nakon dekodiranja primjenom Hammingova koda

1.3.4. Signalna domena prijenosa informacija

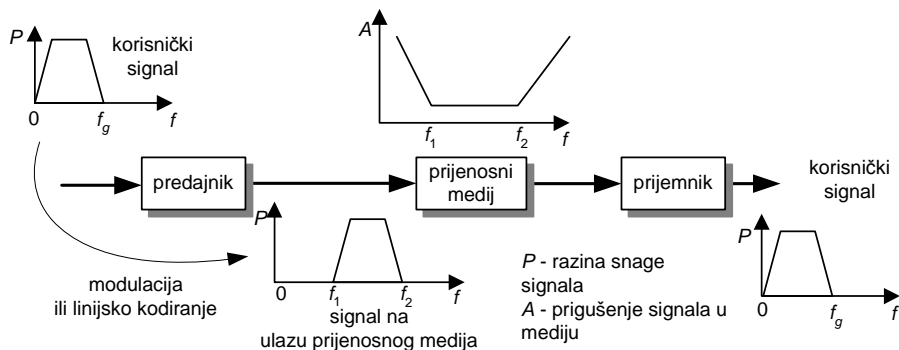
Većina današnjih prijenosnih sustava koristi digitalni način prijenosa podataka. Digitalni signal je slijed diskretnih, diskontinuiranih naponskih impulsa. Svaki takav impuls predstavlja jedan signalni element (*signal element*). Kod prijenosa binarnih podataka bitovi se kodiranjem pretvaraju u signalne elemente koji se prenose medijem. U najjednostavnijem slučaju kodiranje se odvija po načelu jedan za jedan, tj. svaki se bit kodiranjem pretvara u jedan signalni element. Ako je signalni element digitalan, tada se radi o naponskom impulsu stalne amplitude unutar određenog intervala trajanja T , koji se naziva simbolni interval. Koriste se dva formata pravokutnog signala; RZ (Return to Zero) i NRZ (Nonreturn to Zero), prikazana na Sl. 1.11 (Haykin [2001]).



Sl. 1.11 Prikaz simbola signalom

Nasuprot tome, ako je signalni element analogan, tada se radi o impulsu stalne frekvencije, faze i amplitude unutar intervala trajanja T . Brzina slanja podataka (*data rate*) mjeri se u broju poslanih bita u jedinici vremena, tj. bit/s. Brzina slanja podataka najčešće se odnosi na prijenosnu brzinu na ulazu u predajnik, odnosno na izlazu iz prijemnika. Dakle, brzina slanja podataka jednaka je obrnuto proporcionalnoj vrijednosti trajanja bita, $R = 1/T$. Međutim, jednim signalnim elementom moguće je prenijeti i više od jednog bita. Stoga se linijska brzina (*line rate, signaling rate, modulation rate*) mjeri brojem prenetih signalnih elemenata između predajnika i prijemnika, i u tu se svrhu koristi jedinica nazvana *baud*. Na primjer, ako se u prijenosu koristi linijski kod 4B3T koji četiri bita pretvara u tri ternarna simbola koje prenosi medijem pomoću pravokutnih NRZ impulsa, i ako je brzina prijenosa podataka R bit/s, tada linijska brzina iznosi v baud, i vrijedi da je $v = R \times 3/4$.

Jedan od važnih ciljeva koje je potrebno ostvariti kako bi prijenos korisničkih signala prijenosnim medijem bio učinkovit je prilagodba spektra signala raspoloživoj širini prijenosnog pojasa medija. Na karakteristike prijenosnog medija moguće je utjecati u fazi proizvodnje. Međutim, kad se prijenosni medij jednom instalira, njegove su karakteristike nepromjenjive. Nasuprot tome, korisnički uređaji generiraju signale koji imaju svoja vlastita obilježja koja je moguće mijenjati. U tu svrhu koristi se predajnik (*transmitter*) koji treba omogućiti da se karakteristike signala prilagode karakteristikama medija (Sl. 1.12).

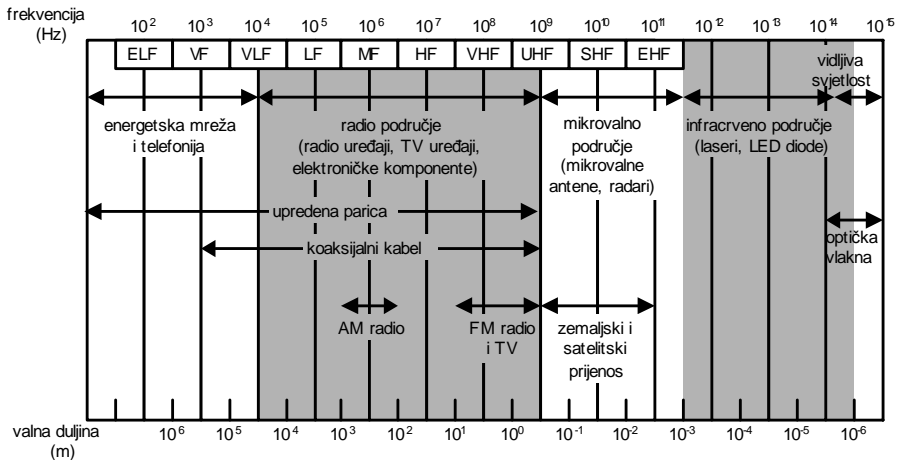


Sl. 1.12 Spektri signala i medija

Postoje dvije skupine metoda koje se koriste u tu svrhu: modulacijski postupci i linijsko kodiranje. Modulacijski postupci koriste digitalni signal kao modulacijski signal pomoću kojeg djeluju na neko od obilježja (amplituda, frekvencija, faza) analognog signala nosioca (*carrier*). Na taj način nastaje analogni modulirani signal koji se prenosi medijem. Linijsko kodiranje pretvara izvorni binarni kod u neki drugi kod (binarni, ternarni, kvaternarni) pogodan za prijenos medijem. U prijemu se obavlja obrnuti postupak, tj. demodulacija, odnosno dekodiranje linijskog koda u izvorni binarni.

Od prijenosnog sustava očekuje se da podatke prenosi na učinkovit i pouzdan način. Učinkovitost prijenosa ogleda se u načinu na koji koristimo prijenosni medij (što su raspoloživi resursi medija bolje iskorišteni, to je prijenos učinkovitiji), a pouzdanost u otpornosti sustava na pogreške koje nastaju u prijenosu.

Na Sl. 1.13 prikazan je dio spektra elektromagnetskog zračenja koji se koristi u pojedinim prijenosnim medijima (Stallings [2001]).



Sl. 1.13 Frekvencijska područja medija

Prijenosne medije moguće je podijeliti u dvije skupine: omeđeni (*guided*) i neomeđeni (*unguided*). U omeđene medije ubrajamo upredene parice (*twisted pair*), koaksijalne kabele (*coaxial cable*) i optička vlakna (*optical fiber*), dok se za prijenos neomeđenim medijem (zrak, voda) koristi i naziv bežični prijenos (*wireless transmission*). Na dizajn komunikacijskog sustava utječu mnogobrojni čimbenici, dio kojih se odnosi na prijenosni medij i signal. Sljedeći čimbenici utječu na brzinu i domet prijenosnog sustava:

- **širina prijenosnog pojasa B** - što je širina prijenosnog pojasa veća, to je moguće postići veću prijenosnu brzinu;
- **izobličenja u prijenosu** - izobličenja, kao na primjer gušenje signala, smanjuju domet prijenosa. Kod omeđenih prijenosnih medija najveće je gušenje signala u upredenim paricama, a najmanje u optičkim vlaknima;
- **interferencija** - smetnje koje potječu od vlastitog ili drugih signala (na primjer, preslušavanje između parica u istom kabelu) imaju za posljedicu izobličenje korisnog signala u prijenosu. Najveće smetnje uslijed interferencije javljaju se u bežičnom prijenosu, ali ih ima i u omeđenim medijima (parice, koaksijalni kabel);
- **broj prijemnika** - kod linkova prema većem broju točaka veći je broj prijemnika spojen na fizički medij, pri čemu svako takvo priključenje

povećava prigušenje i izobličenje signala, što dodatno ograničava domet prijenosa i prijenosnu brzinu.

U prijenosu signala prijenosnim sustavima vrlo se često javljaju izobličenja signala i smetnje. Te dvije pojave rezultiraju degradacijom kvalitete prijenosa, što se u digitalnom prijenosu odražava većim brojem pogrešaka u prijemu. Izobličenja signala nastaju uslijed specifičnih karakteristika medija. Signal se u vremenskoj domeni prikazuje najčešće kao promjena napona ili struje u vremenu. Istodobno, u frekvencijskoj domeni signal se sastoji od dviju komponenata: amplitudne i fazne. Svaki prijenosni medij (parica, optička nit, zrak) prigušuje amplitudu signala, a ujedno i utječe na njegovu faznu komponentu, uslijed čega dolazi do disperzije signala. Uzrok disperziji je u činjenici da se sve frekvencijske komponente koje sačinjavaju spektar signala (*frequency spectrum*) ne rasprostiru kroz medij jednakom brzinom. Uslijed toga se javlja tzv. fazno kašnjenje (*phase delay*), odnosno kašnjenje skupine frekvencija (*group delay*). Ako u prijenosnom lancu postoje nelinearni elementi, tada se pojavljuju i nelinearna izobličenja, koja se ponekad nazivaju i intermodulacijski šum. Za razliku od izobličenja koja je moguće opisati determinističkim modelima, smetnje nastaju stohastički i otežavaju dimenzioniranje sustava. Posebno u paričnom prijenosu, važnu ulogu imaju preslušavanja. U jednom kabelu obično se nalazi nekoliko upredenih parica (parice se i upredaju zato da bi se smanjilo preslušavanje). Signal koji se prenosi jednom paricom prenosi se kapacitivnim i međuinduktivnim vezama i na ostale parice u zajedničkom kabelu. Kod optičkog prijenosa preslušavanje između optičkih niti nije moguće. Ponekad se parični kabeli oklapaju kako bi se zaštitili od vanjskih smetnji, pogotovo od impulsnog šuma, ali i da bi sami manje ometali okolne sustave.

Sveukupni utjecaj smetnji pri prijenosu informacija izražava se odnosom snage signala S prema snazi šuma N : S/N . Širina prijenosnog pojasa B i odnos S/N određuju kapacitet kanala prema prije prikazanom izrazu.

U složenom komunikacijskom sustavu signali i šumovi mogu se modelirati slučajnim procesima pa se snage računaju kao srednje statističke vrijednosti razmatranih procesa. Maksimalni iznos kapaciteta bit će u slučaju kada procesi imaju normalne (Gaussove) karakteristike.

1.3.5. Pristup prijenosnom mediju

U komunikaciji između dvaju uređaja međusobno povezanih linkom od točke do točke (*point-to-point link*), ponekad može doći do preopterećenja ili podopterećenja linka. Poželjno je da taj link ne bude preopterećen jer bi na taj način postao usko grlo u komunikaciji. Međutim, ponekad je kapacitet tog linka nedovoljno iskorišten. U tom je slučaju potrebno omogućiti da link bude