

## Komunikacijski sustavi i mreže

### 6. Prijenosni sustavi

6.	Prijenosni sustavi .....	6-269
6. 4.	Kapacitet prijenosnog kanala .....	6-270
6.4.1	Kapacitet analognog kanala .....	6-270
6.4.2	Kapacitet digitalnog kanala.....	6-273
6. 5.	Višestruko korištenje spojnih putova (multipleks) .....	6-276
6. 6.	Informacijski volumen prijenosnog kanala.....	6-278
6. 7.	Frekvencijski multipleks.....	6-279
6. 8.	Vremenski multipleks .....	6-282
6.8.1	Sinkronizacija u TDM sustavima .....	6-286
6. 9.	Usporedba TDM i FDM: .....	6-290
6. 10.	Multipleks valnih duljina WDM.....	6-291
6. 11.	Pulsno kodna modulacija PCM.....	6-292

Zagreb i Osijek, rujan 2005.

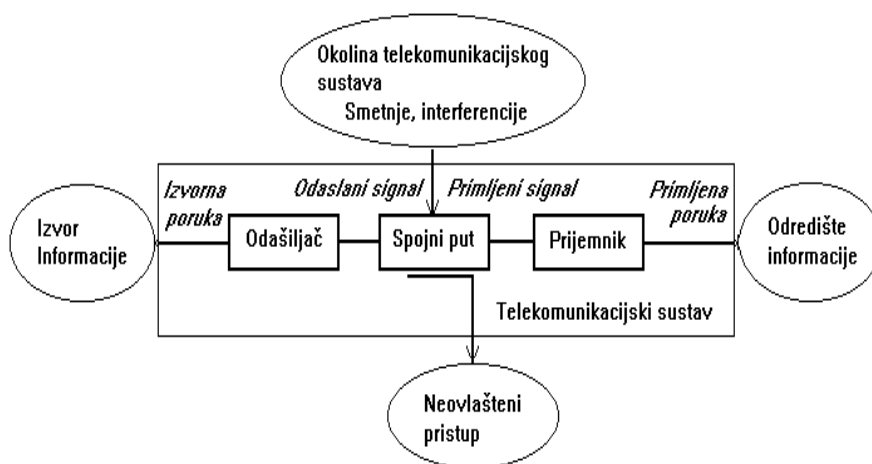
Dr. sc. Predrag Valožić

## 6. Prijenosni sustavi

U uvodnom poglavlju, opisan je telekomunikacijski sustav koji korisnicima omogućiti jednosmjerno komuniciranje: od izvora informacije prema odredištu. Zbog jednostavnosti, takav telekomunikacijski sustav mogli bi označiti kao **jednosmjerni telekomunikacijski kanal**. Zadaća je kanala, osigurati kvalitetan prijenos određene količine informacije za potrebe korisnika.

Kvaliteta usluge (eng. *QoS*) određena je zahtjevima korisnika. Pored ostaloga, kvaliteta usluge odnosi se i na sličnost primljene i izvorne poruke; ako usporedimo s drugim oblicima transporta, npr. roba, da primljena roba bude isporučena onako kako je i predana na otpremu. Za komuniciranje analognih izvornih poruka (govor, glazba, slika i video) mjera kvalitete bio bi udio neželjenih signala (buke, šuma) u signalu primljene poruke. Ako su poruke diskretne (tekst ili podaci) utjecaj smetnji u kanalu manifestira se kao pogreška u prijenosu, te će se poneki od simbola primljene poruke razlikovati od simbola odaslane poruke.

Drugo je mjerilo kvalitete telekomunikacijske usluge – pravovremenost isporuke poruke odredištu, što pak, ovisi o brzini prijenosa informacije telekomunikacijskim kanalom. Dakle, pitanje je: Koji je kapacitet prijenosa komunikacijskog kanala?



Slika 6.1. Jednosmjerni telekomunikacijski kanal

## 6. 4. Kapacitet prijenosnog kanala

Početna ograničenja kapaciteta prijenosnog kanala potječu od ograničenih resursa kojima raspolaže telekomunikacijski sustav: frekvencijski pojas spojnog puta **B**, maksimalna snaga signala **P<sub>S</sub>** te snaga signala buke (šuma) u kanalu **P<sub>N</sub>**.

Prijenosni kanal može biti analogni ili digitalni. Za analogni kanal, mjera kvalitete je odnos frekvencijskog pojasa signala izvorne i primljene poruke, te omjer snaga korisnoga signala i šuma (**S/N**) primljene poruke. Za binarni digitalni kanal, kvaliteta primljene poruke izražena je vjerojatnošću pogreške **P<sub>e</sub>** u prijenosu binarnih elementa – bita<sup>1</sup> (**BER** eng. *Bit Error Ratio*). Kako se digitalni prijenos temelji na fizičkom – analognom kanalu, to prijenosni kapacitet **C<sub>0</sub>** određujemo za analogni kanal (**B** i **S/N**), te na tu veličinu dodajemo utjecaj pogreške u digitalnom kanalu (**P<sub>e</sub>** tj. **BER**).

### 6.4.1 Kapacitet analognog kanala

O čemu ovisi **C<sub>0</sub>**, kapacitet kanala bez pogrešaka u prijenosu?

1. Prijenosni sustav tvore jedna ili više parica, optičkih niti, koaksijalnih tuba... Tu dimenziju prijenosnog sustava nazvati ćemo **prostor P**. Ako je u sustavu **n** parica umjesto jedne, za očekivati je kako će prijenosni kapacitet biti **n** puta veći od kapaciteta sustava s jednom paricom.
2. Druga dimenzija – neovisna od prethodne, jest trajanje prijenosa: **vrijeme T**. Ako komunikacija može trajati **T** sekundi umjesto 1s, za očekivati je kako će se moći prenijeti **T** puta veća količina informacije.
3. Treća neovisna veličina o kojoj ovisi propusnost sustava jest raspoloživi **frekvencijski pojas** po jednom vodu **B**. Jedan kanal u jednoj sekundi može prenijeti 2 neovisna impulsa po jednom Hz širine kanala u osnovnom frekvencijskom pojasu (brzina telegrafiranja, prijenos klasičnim telefonskim sustavom, video signal i TV). Dakle, jednim kanalom širine pojasa **B** [Hz], moći će se prenijeti **B** puta veća količina podataka u 1 s.
4. Maksimalna snaga signala i šum u vodu (**S/N**) određuju četvrtu veličinu koja dimenzionira transportne mogućnosti prijenosnoga sustava, **dinamiku D**. U

---

<sup>1</sup> Uz jedinicu za količinu informacije, **bit** se odnosi i na binarnu znamenku: *binary digit*.

prethodnom slučaju (3.) brzina telegrafiranja i brzina prijenosa podataka jednake su u binarnom sustavu, s dvije razine signala. Ako broj razina povećamo na **4**, brzina prijenosa informacije biti će **2** puta veća od brzine telegrafiranja, s **8** razina omjer će biti **3** itd. Zaključujemo, da brzina prijenosa informacije se povećava s logaritmom po bazi 2 (**ld**) od broja razina signala.

Kapacitet jednog voda (**P=1**), u jednoj sekundi (**T=1s**) **C<sub>0</sub>** određuju:

Broj impulsa koje prijenosni sustav može propustiti u jednoj sekundi (**v<sub>TG</sub>** brzina telegrafiranja [**Bd**]) jednak je **2B**, količina informacije [**b**] po jednom impulsu je **ld N**, gdje je **N** broj različitih impulsnih stanja (amplitude, faze, frekvencije ili kombinirano), te možemo pisati:

$$C_0 = 2 \cdot B \cdot \text{ld } N \text{ [b/s]} \quad (6.15.)$$

**Primjer 6.1. :** Koji je kapacitet **C<sub>0</sub>** telefonskog kanala?

Frekvencijski pojas telefonskoga kanala je od 0,3 do 3,4 kHz, te je širina raspoloživa za komunikaciju **B = 3,1 kHz**. Ako je prijenos binarni, dvije su moguće vrijednosti impulsa, **N=2**, te je:

$$C_2 = 2 \cdot 3100 \cdot \text{ld } 2$$

$$C_2 = 6200 \text{ [b/s]}$$

**Primjer 6.2. :** Što ako kanal nije binarni?

Neka je oktalni (**N=8**) ili heksadecimalni (**N=16**)?

$$C_8 = 2 \cdot 3100 \cdot \text{ld } 8$$

$$C_8 = 18.600 \text{ [b/s]}$$

$$C_{16} = 2 \cdot 3100 \cdot \text{ld } 16$$

$$C_{16} = 24.800 \text{ [b/s]}$$

**N = 128** dalo bi **C<sub>128</sub>=43,4 [kb/s]**, za **N=256** dobili bi smo **49,6 [kb/s]** ...Možemo li nastaviti s proizvoljnim uvrštavanjem sve većih vrijednosti za **N**? Postoji li fizikalno ograničenje za **N**?

Što znači **N=2, N=4, 8, 16, 128, 256, ...**?

Koder signala (odašiljač) morao bi moći odaslati toliko različitih vrijednosti amplituda signala. To nije nerješivi problem. Problemi nastaju na strani dekodera (prijemnika), koji sve

te vrijednosti mora pouzdano razlikovati (razlučiti) kako ne bi nastupila pogreška u dekodiranju!

Problem je sličan mjerenju:

Možemo li izmjeriti N različitih vrijednosti napona ili struje?

Ovisi li zaključak samo o mjernom instrumentu?

Što je s utjecajem izobličenja signala, gušenja, buke, smetnji, interferencija? Postoji li utjecaj vida osobe koja očitava pokazivanje analognog mjernog instrumenta?

Šum na vodu otežava razlučivanje vrijednosti signala koje su manje od efektivne vrijednosti napona šuma, te razlučivost amplitudnih razina N ovisi o omjeru napona signala  $U_S$  i napona šuma  $U_N$ .

$$N \sim U_S / U_N$$

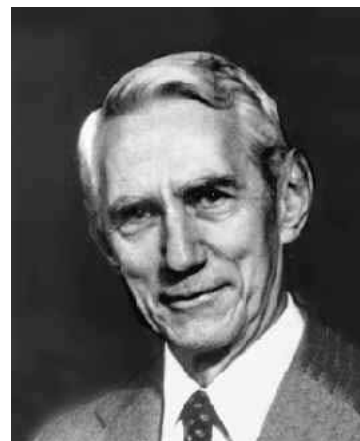
Dakle, kapacitet kanala bio bi proporcionalan:

$$C \sim 2 \cdot B \cdot \lg(U_S/U_N)$$

Ako 2 uključimo u logaritam,

$$C \sim B \cdot \lg(U_S/U_N)^2$$

$$C \sim B \cdot \lg(P_S/P_N)$$



Claude Shannon dokazao je<sup>2</sup>, kako je kapacitet kanala u prisutnosti šuma:

$$C = B \cdot \lg(1 + S/N) \quad [\text{b/s}] \quad (6.16.)$$

Član  $\lg(1+S/N)$  Shannonova teorema određuje broj mogućih vrijednosti signala, te je to **dinamika** signala **D**.

**Primjer 6.3. :** Koji je kapacitet kvalitetnog telefonskog kanala ( $S/N=66$  dB)?

$$B = 3,1 \text{ kHz}, \quad S/N = 66 \text{ dB}$$

$$S/N = 10^{66/10} = 3.981.072$$

$$C_0 = 3100 \cdot \lg(3.981.073)$$

$$C_0 = 3100 \cdot 21,9 = 67,967 \text{ kb/s}$$

---

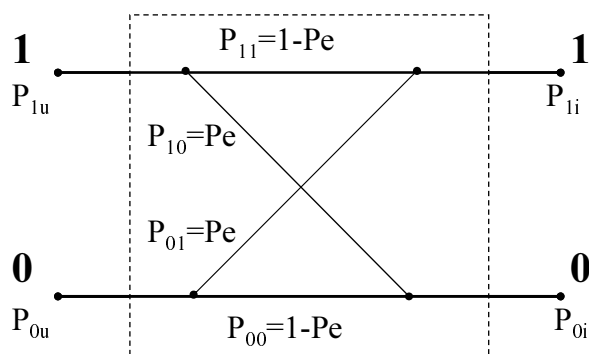
<sup>2</sup> Shannonov teorem

Kako iskoristiti raspoloživi kapacitet kanala  $C_0$ ?

Na to pitanje, Shannonov teorem ne daje odgovor. To je problem telekomunikacijske tehnike.

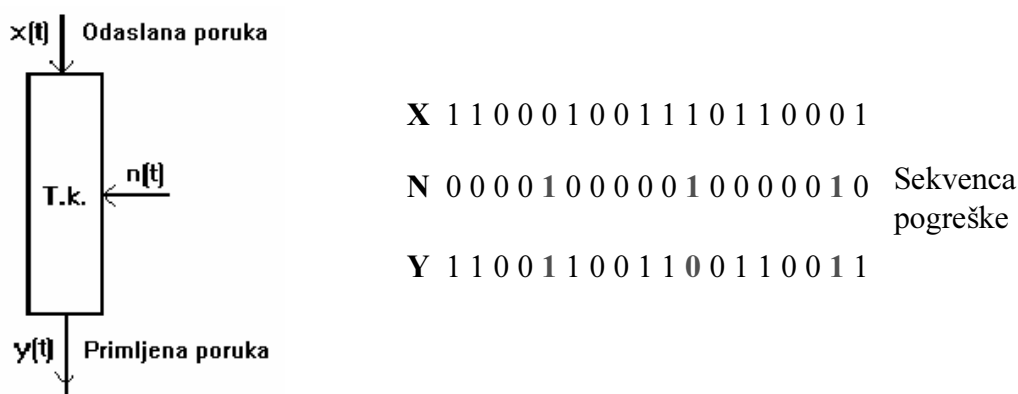
### 6.4.2 Kapacitet digitalnog kanala

Analogna "podloga" digitalnog telekomunikacijskog kanala osigurava kapacitet  $C_0$  definiran je u (6.16). Kako na tu vrijednost djeluje pogreška u prijenosu binarnim simetričnim kanalom (BSC).



Slika 6.2. Binarni simetrični kanal BSC

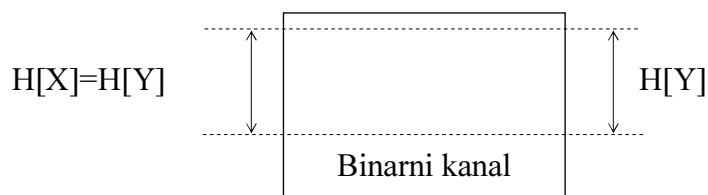
Pogreška u prijenosu binarne digitalne poruke znači, da je umjesto simbola "1" na ulazu, na izlazu se pojavio simbol "0" ili obratno, od "0" nastalo je "1". U prikazu BSC-a (Slika 6.2) to je grafički prikazano dijagonalama, uz koje je upisana vjerojatnost pogreške  $P_e$ . Vodoravne crte označavaju ispravan (korektan) prijenos, vjerojatnost kojega je  $P_c = 1 - P_e$ .



Slika 6.3. Pogreška i sekvenca pogreške u BSC-u

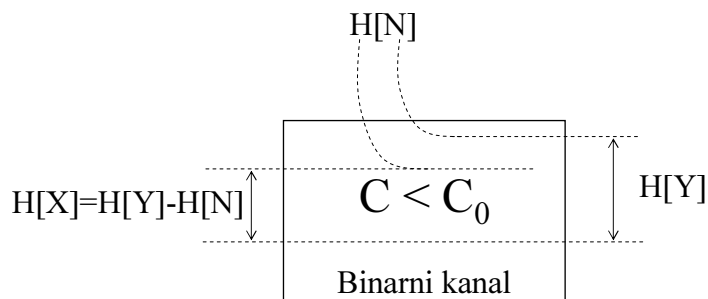
Uz pretpostavljenu odaslanu sekvenču binarnih simbola  $X$  (Slika 6.3) i primljenu sekvenču  $Y$ , moguće je odrediti tzv. "sekvenču pogreške"  $N$ . Sekvenča pogreške posljedica je

utjecaja izobličenja i šuma u analognom kanalu, te je u ovom prikazu tek model za prikaz tog utjecaja na "digitalan" način.



Slika 6.4. Entropija kanala bez pogrešaka

Kada ne bi bilo pogrešaka u prijenosu, tada bi ukupna entropija izlaznog signala  $Y$  kanala bila na raspolaganju za prijenos poruke. U slučaju BSC-a to bi značilo entropiju<sup>3</sup> od  $H_Y=1$  [bit]. Entropija izlazne sekvence ne može biti veća od 1 bit. Ako nema vanjskih utjecaja na neizvjesnost pojavljivanja binarnih simbola na izlazu kanala, tada je jedini uzrok te neizvjesnosti ulazna sekvenca dakle, kanal je u cijelosti na raspolaganju za prijenos informacije iz izvora  $H_X=H_Y=1$  [bit]. Kapacitet prijenosa informacije je 1 bit po binarnom simbolu. Brzinu prijenosa binarnih simbola određuje "niža", fizička analogna razina kanala te je kapacitet prijenosa  $C_0$  [bit/s].



Slika 6.5. Entropija kanala s pogreškama

Pod utjecajem izobličenja signala u kanalu i šuma, nastaju pogreške u prijenosu binarnih simbola, te je pojava binarnih simbola na izlazu neizvjesna iz dva razloga: digitalne sekvence koju kanal prenosi i sekvence pogreške. Kako izlazna entropija  $H_Y$  ne može biti veća od 1 [bit], to znači da će neizvjesnost koja potječe od šuma i posljedične sekvence pogreške umanjiti ostatak neizvjesnosti (entropije) na raspolaganju za prijenos informacije komunikacijskim kanalom.

Entropija sekvence pogreške je

---

<sup>3</sup>  $H_0 = -p_0 \cdot \log p_0 - p_1 \cdot \log p_1 = -0,5 \cdot \log(1/2) - 0,5 \cdot \log(1/2) = 0,5 + 0,5 = 1$  [bit]

$$H[N] = -P_e \cdot \lg(p_e) - (1-P_e) \cdot \lg(1-P_e) \quad (6.17.)$$

Ostatak entropije raspoloživ za komunikaciju je  $H[X]=1-H[N]$ , te je:

$$H[X] = 1 - [-P_e \cdot \lg(P_e) - (1-P_e) \cdot \lg(1-P_e)] \quad (6.18.)$$

U odnosu na kapacitet kanala bez grešaka u prijenosu, s pogreškama vjerojatnosti  $P_e$ , kapacitet kanala biti će<sup>4</sup>:

$$C = C_0 \cdot [1 + P_e \cdot \lg(P_e) + (1-P_e) \cdot \lg(1-P_e)] \quad (6.19.)$$

**Primjer 6.4. :** Izračunati kapacitet binarnog simetričnog kanala, ako je vjerojatnost pogreške u prijenosu binarnih simbola  $P_e = 0; 0,1; 0,01$  i  $0,001$ . Prijenos jednog binarnog simbola traje  $T_1=10^{-4}$  s; brzina telegrafiranja je 10 kBd.

Rješenje:

Bez pogreški u prijenosu ( $P_e = 0$ ), kapacitet kanala jednak je

$$C_0 = 1/T_1 = 10 \text{ kbit/s.}$$

Ako je  $P_e = 0,1$ , kapacitet je :

$$C_{0,1} = C_0 \cdot (1 + 0,1 \cdot \lg 0,1 + (1-0,1) \cdot \lg(1-0,1))$$

$$C_{0,1} = C_0 \cdot (1 - 0,33219 - 0,1368)$$

$$C_{0,1} = 0,5303 \cdot C_0 = 5,303 \text{ [kbit/s].}$$

$$\text{Slično, za } P_e = 0,01 \quad C_{0,01} = 9,1921 \text{ [kbit/s].}$$

$$P_e = 0,001, \quad C_{0,001} = 9,886 \text{ [kbit/s].}$$

Zaključak je očekivan: manje pogrešaka u prijenosu, kapacitet je bliži vrijednosti bez grešaka u prijenosu  $C_0$ . Zanimljivo je, što se događa ako vjerojatnost pogrešaka raste više od 0,1. Izračunate vrijednosti prikazane su u Tablica 6.1:

$P_e$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$1-P_e$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
<b>C</b>	<b>5,31</b>	<b>2,78</b>	<b>1,19</b>	<b>0,29</b>	<b>0,00</b>	<b>0,29</b>	<b>1,19</b>	<b>2,78</b>	<b>5,31</b>

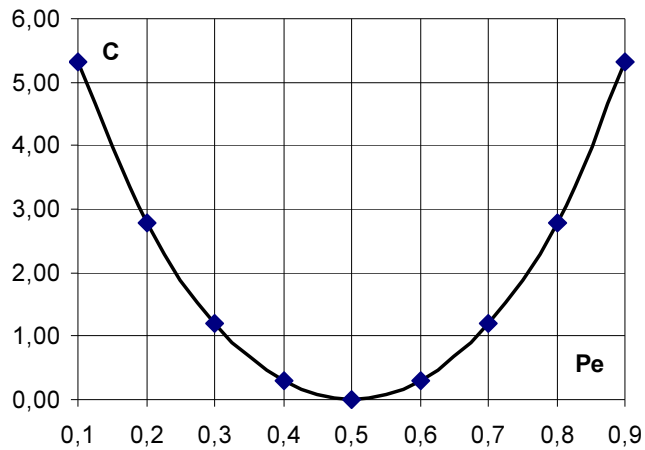
Tablica 6.1. Kapacitet kanala iz Primjer 6.4. : ovisno o vjerojatnosti pogreške  $P_e$

Nacrtamo li graf prema tablici Tablica 6.1, dobijemo:

---

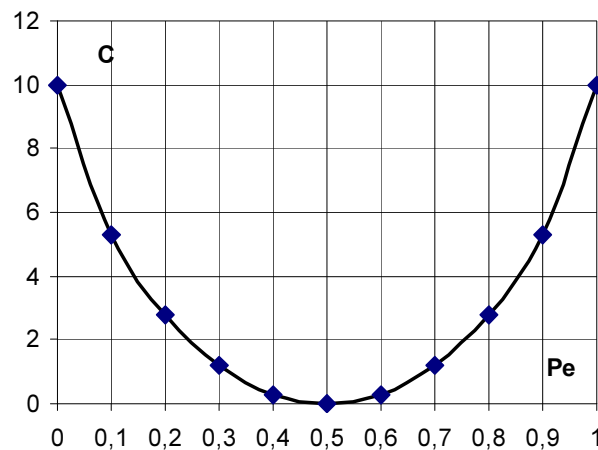
<sup>4</sup> Na prvi pogled, reklo bi se kako je  $C > C_0$  jer vrijednosti 1 dodajemo dva pribrojka, Ali ...?





Slika 6.6. Kapacitet kanala iz  
Primjer 6.4. : ovisno o vjerojatnosti  
pogreške  $Pe$

Iz simetričnosti grafa, te poznate činjenice kako je bez pogrešaka kapacitet kanala  $C_0$ , zaključak je kako i za 100% grešaka u prijenosu  $Pe=1$ , također imamo na raspolaganju kanal kapaciteta  $C_0$ ; kao kada nema pogrešaka!



Slika 6.7. Kapacitet kanala iz  
Primjer 6.4. : proširen do  $Pe=0$  i  
 $Pe=1$

Kako pojasniti prethodni  
zaključak?

Ima li primjera u svakodnevnom životu, koji ukazuju na sličnu situaciju?

## 6. 5. Višestruko korištenje spojnih putova (multipleks)

Promatrano iz okoline telekomunikacijskoga sustava, kako to vidi korisnik, redovit je slučaj, da spojni put može propustiti znatno veću količinu informacija od one koju određeni izvor informacije generira. Promatrano unutar telekomunikacijskoga sustava, kako to vidi vlasnik sustava, telekomunikacijski vod, najčešće može propustiti znatno širi frekvencijski pojas nego što je frekvencijski pojas signala odašiljača.

S druge pak strane, najveće investicije u telekomunikacijskim sustavima su u kablove, linije i opremu spojnih putova, te je ekonomski interes da se raspoloživi vodovi što više iskoriste. Zato, od najranijih dana razvitka telekomunikacijskih sustava, nastaju i razvijaju se metode višestrukog korištenja spojnih putova (multipleks). Jedan primjer već je spomenut -

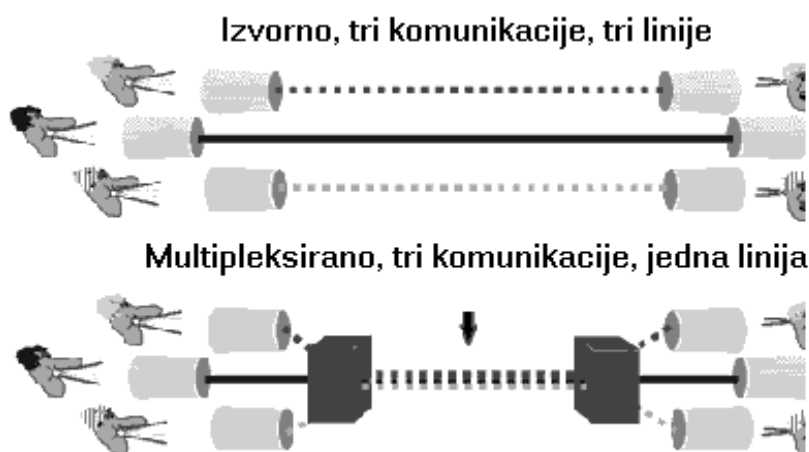
telegrafski multipleks. Slično je i s telefonskim sustavima, sustavima prijenosa podataka, te s kombiniranim prijenosnim sustavima.

Suvremeni multipleksni sustavi su adaptivni, mogu mijenjati raspodjelu kapaciteta sukladno zahtjevima korisnika, raspoloživih resursa i definiranim prioritetima. To, u stvari, znači objedinjavanje funkcije multipleksiranja i koncentracije prometa u telekomunikacijskom sustavu.

Postavljaju se slijedeća pitanja o odnosu količine informacije koju treba prenijeti i kapaciteta prijenosnog sustava:

- Može li prijenosni sustav prenijeti ponuđenu količinu informacije?
- Odgovara li signal svojstvima prijenosnog sustava?
- Može li se nekoliko signala iz različitih izvora prenijeti istim sustavom?
- Ako je prethodno moguće, kako to učiniti?
- Koje su to karakteristike prijenosnog sustava koja definiraju njegove mogućnosti prijenosa informacije?
- Što ako je ponuđena količina informacija promjenljiva?

Očito je, moramo definirati zajedničku mjeru koja bi omogućila usporedbu “želja” i “mogućnosti”, ma s koje strane pristupili problemu - korisničke ili vlasničke. Korisnicima ekonomičnije korištenje resursa znači nižu cijenu usluge, a vlasniku – niže troškove i veći profit. Zajednička je mjera, **informacijski kapacitet kanala**.



Slika 6.8. Ideja multipleksiranja govornih signala

## 6. 6. Informacijski volumen prienosnog kanala

Informacijski kapacitet prienosnog kanala određuje ukupne mogućnosti prijenosa informacija (teret) telekomunikacijskim kanalom (transportni sustav). “Teret” čini količina informacije [bit], koja pak, ovisi o izdašnost izvora informacije [b/s] i trajanju prijenosa [s].

Kako odrediti “transportne” mogućnosti kanala, te kako ih usporediti s prethodnim veličinama?

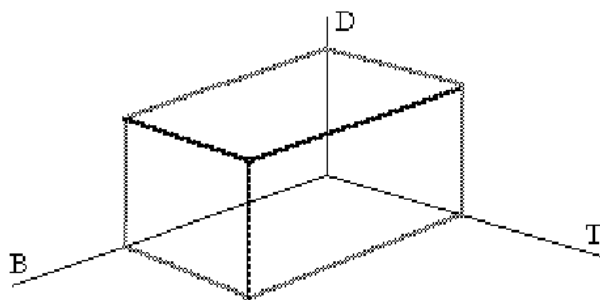
Jedan kanal ( $P=1$ ) tijekom  $T$  sekundi može prenijeti:

$$C_0 \cdot T = B \cdot D \cdot T \quad [\text{b}] \quad (6.20.)$$

informacije.

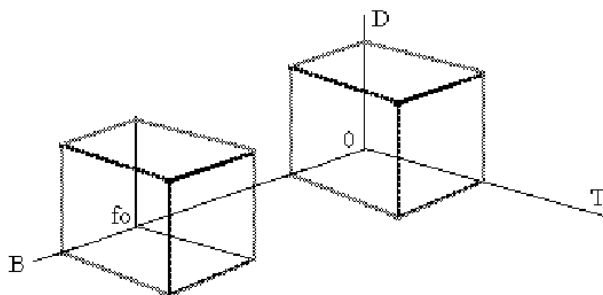
Tri neovisne varijable ( $B$ ,  $D$  i  $T$ ) moguće je prikazati u prostornom pravokutnom koordinatnom sustavu. Tako dobivamo **informacijski volumen kanala** (Slika 6.9).

Slika 6.9. Geometrijski prikaz informacijskog volumena jednog kanala ( $P=1$ )



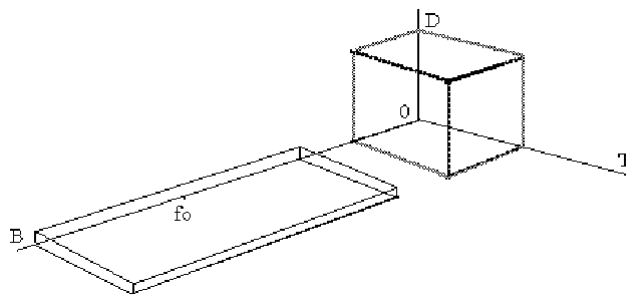
Zadaća je odašiljača (modulacija, multipleks...), što bolje ispuniti raspoloživi volumen!

USB (AM bez nosećeg signala i donjeg bočnog pojasa) modulator odašiljača čuva širinu pojasa signala, ali donja frekvencija nije 0 Hz nego  $f_0$ , što je i temeljna zadaća modulatora.



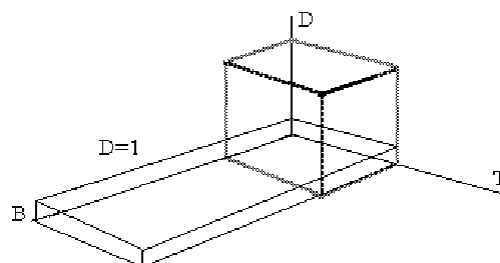
Slika 6.10. Transformacija informacijskoga volumena SSB modulacijom

*Slika 6.11. Transformacija  
informacijskoga volumena FM ili PM  
modulacijom*



Kutno modulirani signal (FM ili PM) ima konstantnu amplitudu, što bi značilo da je dinamika  $D=0$  (Slika 6.11). Tada bi širina spektra moduliranog signala morala biti beskonačno velika. Kako to nije moguće, realni signali imaju ograničeni frekvencijski pojas ( $B_{FM}=2(\Delta f+f_{mg})$ ). Posljedica ograničenja frekvencijskog pojasa su promjene amplitude moduliranoga signala.

*Slika 6.12. Transformacija informacijskoga  
volumena A/D pretvorbom*

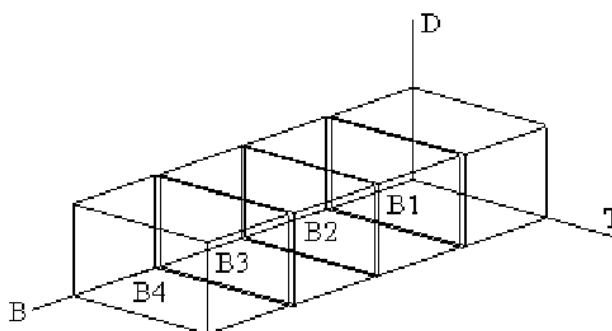


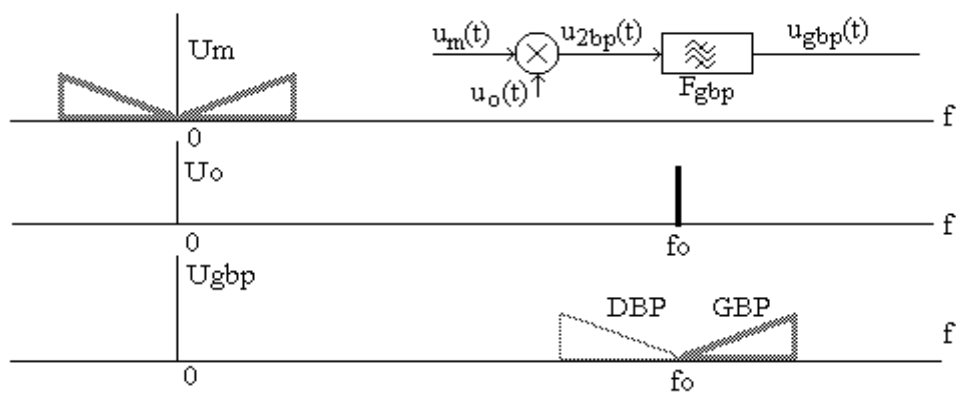
A/D pretvarač mijenja dinamiku signala na vrijednost  $N=2$ . Kako radi u realnom vremenu, to je ukupni volumen moguće sačuvati samo značajnom promjenom širine frekvencijskog pojasa signala B (slika 3.38.)

## 6. 7. Frekvencijski multipleks

Najstariji, frekvencijski multipleks nastaje "slaganjem" signala po frekvencijskoj osi B informacijskog volumena prijenosnog sustava (Slika 6.13). To se postiže jednobočnom amplitudnom modulacijom (SSB) s nosećim signalima različitih frekvencija, signalima iz različitih izvora informacije. Djelovanje jednog SSB modulatora, translatora signala u frekvencijskoj domeni prikazano je na Slika 6.10 a blok shema je na Slika 6.14.

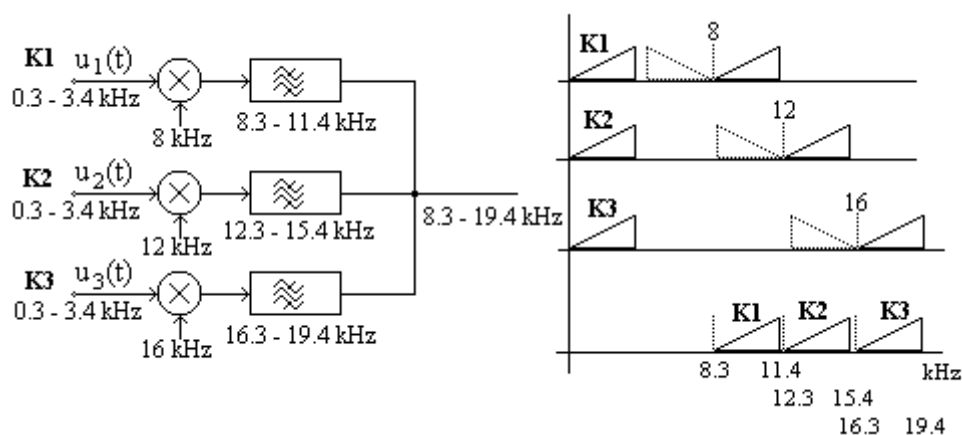
*Slika 6.13. Informacijski volumen  
FDM signala*



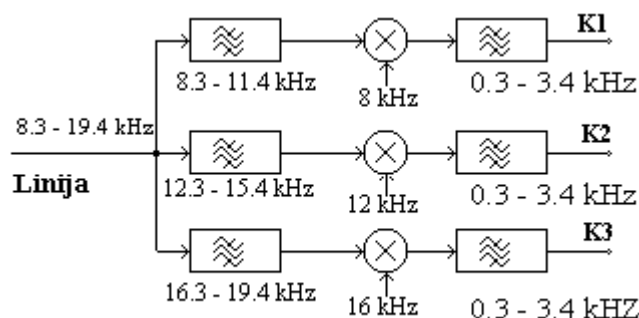


Slika 6.14. Premještanje (transpozicija) signala u frekvencijskoj domeni primjenom SSB modulacije

Primjer multipleksiranja tri telefonska kanala prikazan je na Slika 6.15.



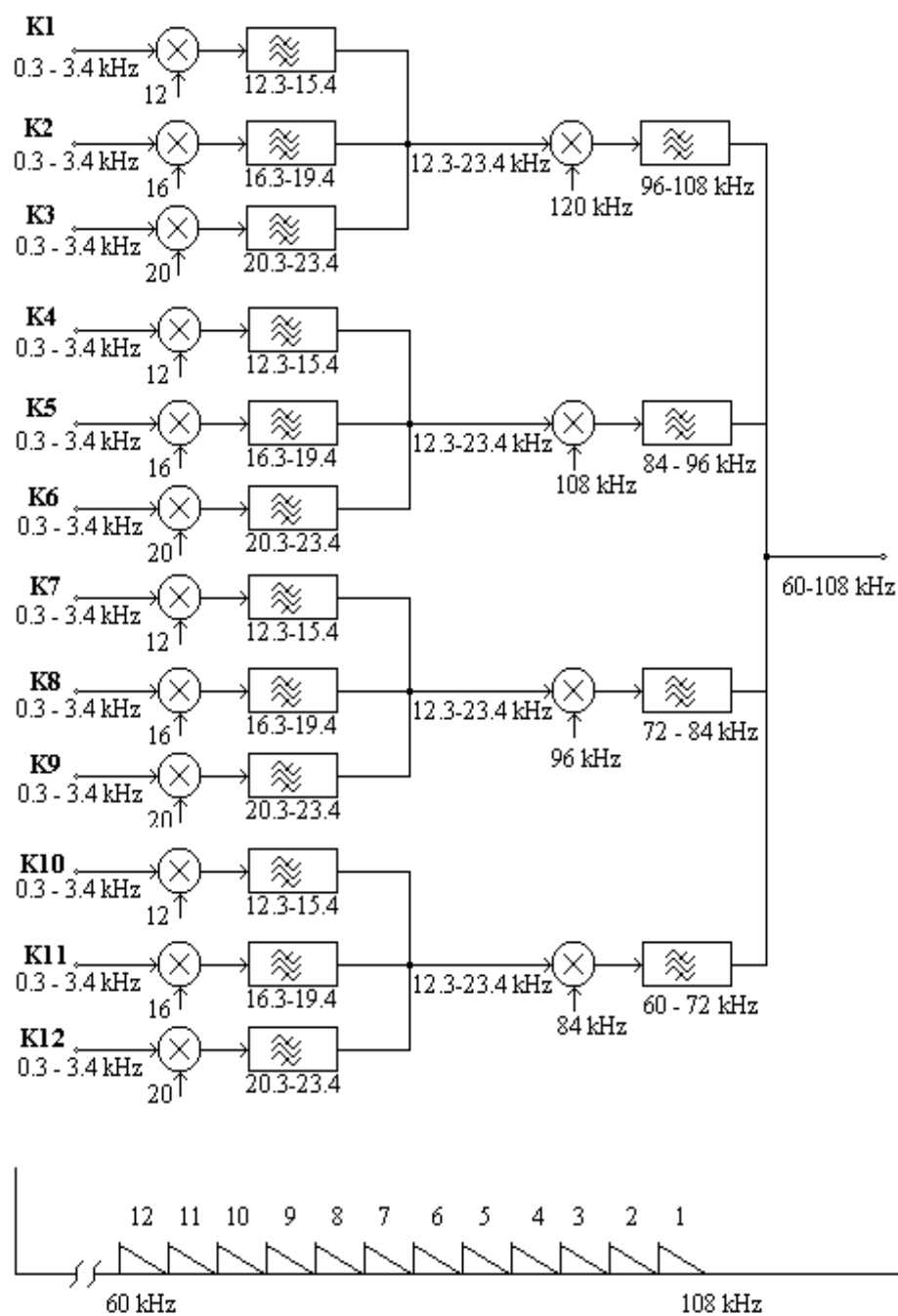
Slika 6.15. Blok-shema i frekvencijski raspored kanala trokanalnog FDM



Na prijemnoj strani obavlja se obratni postupak, razdvajanja ili demultipleksiranja kanala. Za trokanalni multipleks, odgovarajući demultipleks, prikazan je na Slika 6.16.

Slika 6.16. Demultipleksiranje 3-kanalnog FDM signala

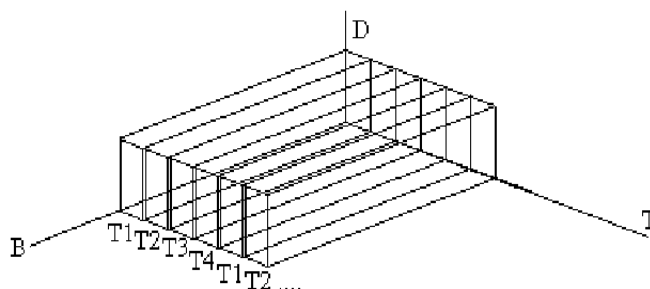
Standardizirani su FDM sustavi s velikim brojem kanala. Za višekanalne sustave, multipleksiranje je postepeno: formiraju se neposredno ili posredno prvo grupe od 12 kanala (primarna grupa A ili B) zatim sekundarne grupe po 60 kanala, tercijarne sa po 300 kanala itd. Primarna grupa B, te postupak tvorbe, prikazani su na Slika 6.17.



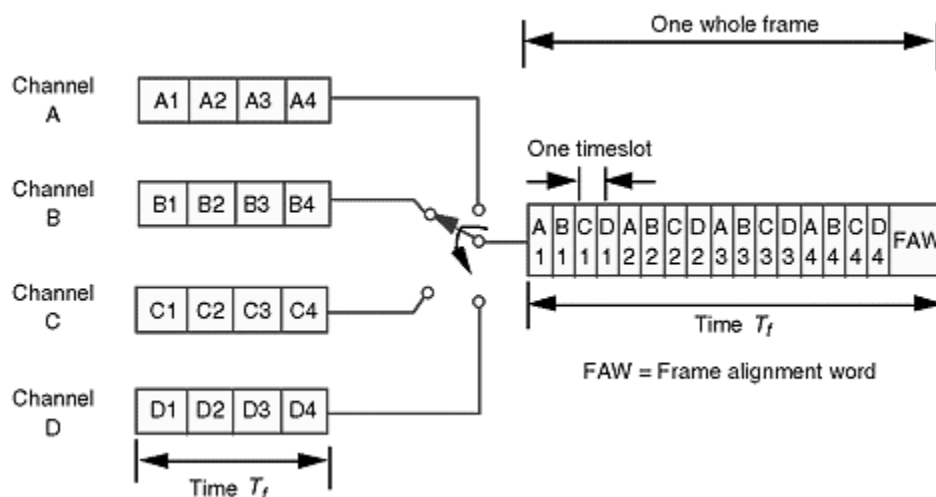
Slika 6.17. Blok-shema primarne grupe B i raspored kanala

## 6. 8. Vremenski multipleks

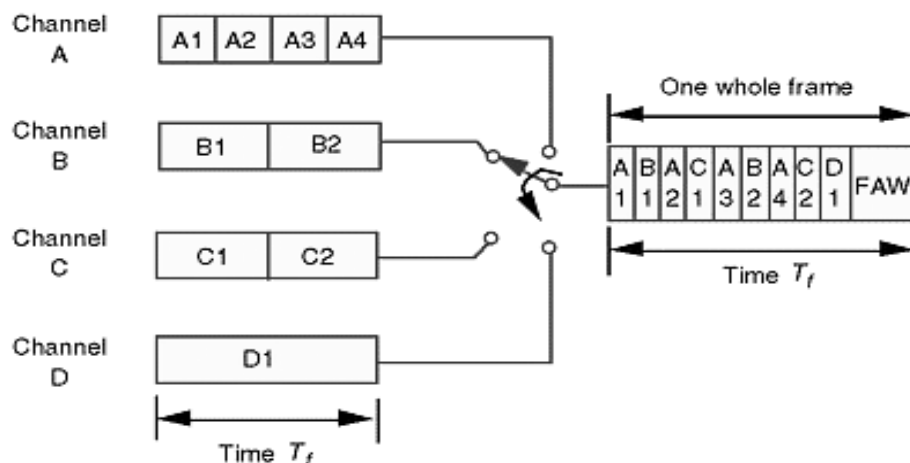
U sustavu vremenskog multipleksa (TDM *Time Division Multiplexing*), multipleksiraju se digitalni signali (Slika 6.18). Standardni postupak A/D pretvorbe govornog signala u telekomunikacijskim sustavima jest PCM s izlaznim digitalnim signalom brzine (izdašnosti) 64 kbit/s. Binarni digitalni signal nosi 1 bit informacije po impulsu, što znači da je vremenski interval između dva impulsa  $T_b = 1/64000 = 15,625 \mu\text{s}$ . Trajanje impulsa  $\tau$  može biti kraće od  $T_b$ , te ako je  $T_b/\tau = N_k$ , to znači da u intervalu  $T_b$  možemo odaslati jedan za drugim impulse PCM signala  $N_k$  različitih izvora (eng. *tributary* pritok). Prijenosni sustav mora biti sposoban prenositi impulse trajanja  $\tau$ . Ovo je temeljna ideja multipleksiranja u vremenskoj domeni. U stvarnosti, ne multipleksiraju se pojedinačni bitovi (Slika 6.19 i Slika 6.20) već **okteti** (byteovi, riječi), grupe od 8 bita jednoga PCM okvira (Slika 6.21).



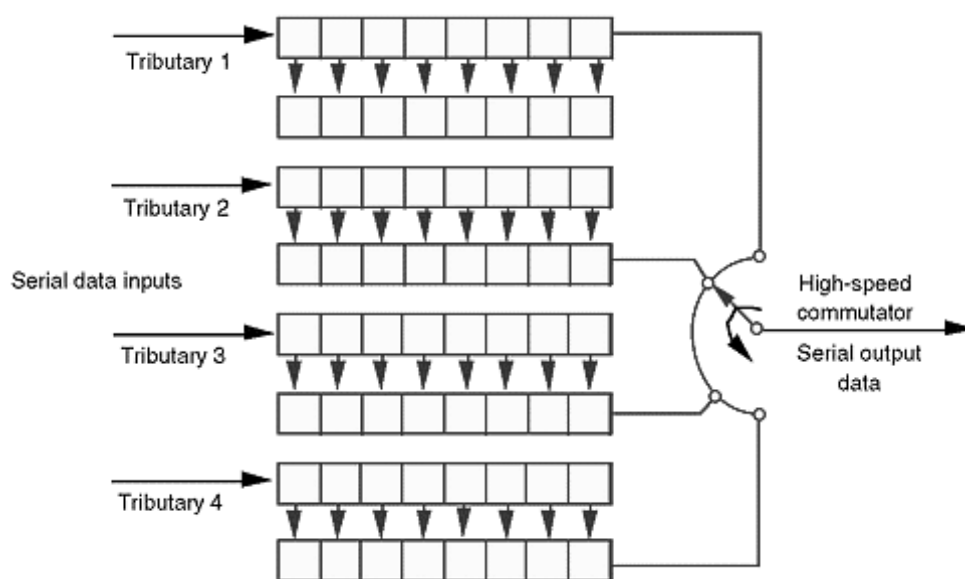
Slika 6.18. Princip organizacije informacijskog volumena 4-kanalnog TDM



Slika 6.19. TDM s multipleksiranjem bitova izvora (pritoka) jednakih izdašnosti (brzina)



Slika 6.20. TDM s multipleksiranjem bitova izvora (pritoka) različitih izdašnosti (brzina)

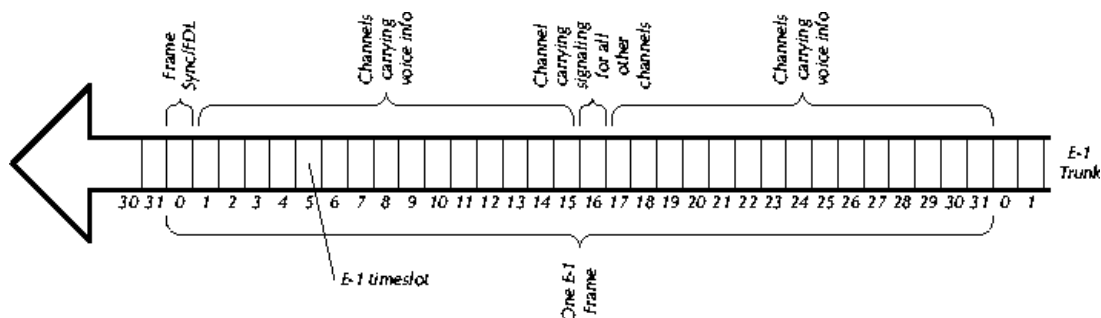


Slika 6.21. TDM s multipleksiranjem byteova

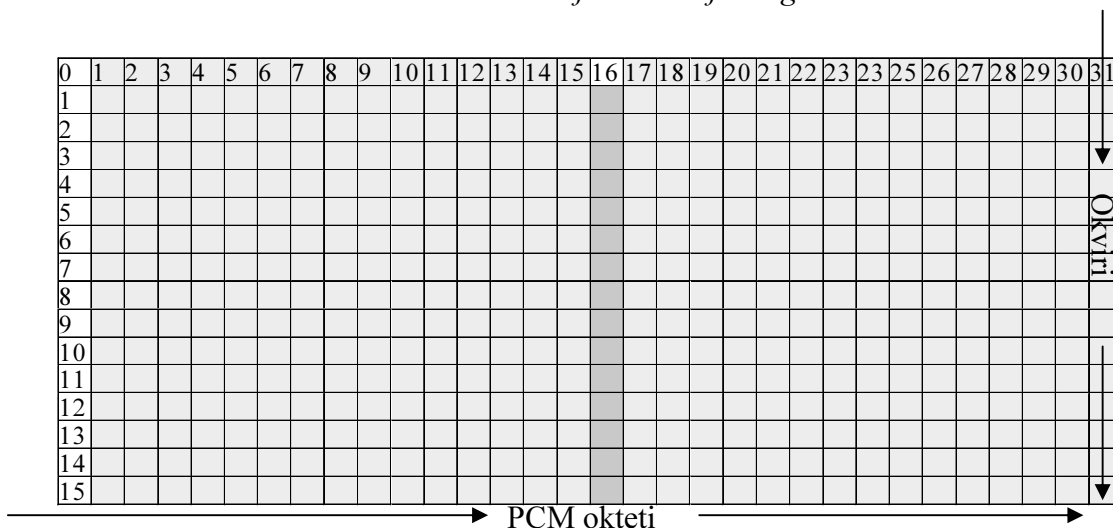
Dva su standarda vremenskog multipleksiranja u klasičnim digitalnim telefonskim komunikacijskim sustavima (TDM - *Time Division Multiplexing*) - europski i američki. Ovdje će biti opisan samo europski **E1**, (30+2)-kanalni vremenski multipleks.

Riječi 30 komunikacijskih i 2 pomoćna kanala vremenski su multipleksirane u **okvir** koji sadrži 32 vremenska intervala, označena s **0** do **31** (Slika 6.22 i Slika 6.23). Pomoćni kanali služe za vremensku sinkronizaciju, te za potrebe signalizacije komunikacijskih kanala. Jedan **složeni** okvir sačinjava 16 okvira, označenih brojevima **0** do **15**.





Slika 6.22. Vremenski slijed okteta jednog E1 PCM okvira



Slika 6.23. Organizacija složenog okvira E1 TDM 30+2 kanalnog multipleksa

Sinkronizacijska riječ okvira dužine 7 bita nalazi se u 0-tom oktetu parnih okvira (0, 2, ...) (Slika 6.24). Prvi bit **R** svih 0-tih okteta, služi za upravljanje u međunarodnim komunikacijama. Drugi bit 0-tog okteta neparnih okvira (1., 3., 5., ...) je 1. Treći bit **A**, 0-tog okteta neparnih okvira, alarm je sinkronizacije okvira, dok preostali biti (4. do 8.) su **n**-biti, i služe za usmjeravanje unutar nacionalne mreže. Prva 4 bita, 16. okteta, nultog okvira, kodna su riječ sinkronizacije složenog okvira. Bitovi "**x**", (5., 7. i 8.) 16. okteta, služe za usmjeravanje u nacionalnim mrežama, dok 6. bit "**y**", 16. okteta nultog okvira, alarm je sinkronizacije složenog okvira. Riječ 16, ostalih okvira (1. do 15.), što tvore jedan složeni okvir, podijeljena u dvije 4-bitne signalizacijske riječi. Te dvije riječi služe za signalizaciju dva komunikacijska kanala, i to u prvom okviru za komunikacijske kanale 1. i 16., u drugom za kanale 2. i 17., trećem za 3. i 18., ... do 15. okvira, gdje su u 16. oktetu signalizacijske riječi komunikacijskih kanala 15. i 30.

	0.	1...	15.	16.	17...	31.
0.	R Sinkronizacija okvira, 7 bitova	inf.	inf.	Sink.sl. okvira	x y x x	inf. inf.
1.	R 1 A n	inf.	inf.	1. sig.	16. sig.	inf. inf.
2.	R Sink. okvira	inf.	inf.	2. sig.	17. sig.	inf. inf.
3.	R 1 A n	inf.	inf.	3. sig.	18. sig.	inf. inf.
.						
.						
15.	R 1 A n	inf.	inf.	15. sig.	31. sig.	inf. inf.

**inf.** informacijski okteti

**1. sig.**, signalizacija 1. kanala, itd.

**R** ... upravljanje u međunarodnim komunikacijama

**A** ... alarm sinkronizacija okvira

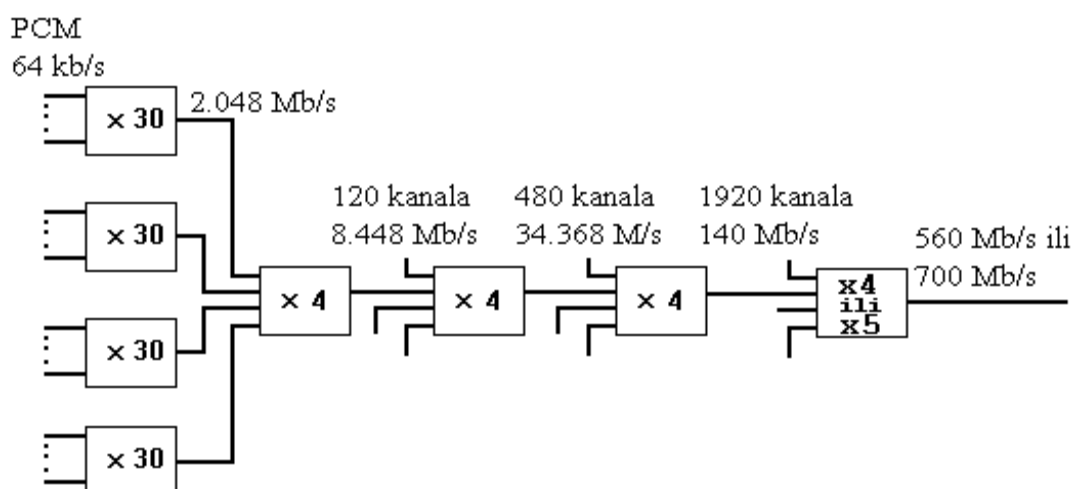
**n** ... usmjeravanje u nacionalnoj mreži

**x** ... usmjeravanje u nacionalnoj mreži (5., 7. i 8. bit)

**y** ... alarm sinkronizacija složenog okvira (6. bit)

Slika 6.24. Raspored pojedinih bitova E1, 30+2 - kanalnog vremenskog multipleksa

Složeniji sustavi vremenskog multipleksa, formiraju se prema principima prikazanim na Slika 6.25. Četiri 30-kanalna primarna sustava, formiraju jedan sekundarni, 120 kanalni sustav digitalnog protoka 8448 kbit/s. Četiri sekundarna, formiraju jedan tercijarni sustav kapaciteta 480 telefonskih kanala i protoka 34.368 Mbit/s. Četiri 480-kanalna, formiraju jedan sustav kapaciteta 1920 kanala, protoka 140 Mbit/s i konačno 4 ili 5 sustava kapaciteta 1920 kanala, formiraju jedan, kapaciteta 7680 odnosno 9600 kanala i digitalnog protoka 420 Mbit/s odnosno 560 Mbit/s.



Slika 6.25. Hijerarhija vremenskog multipleksa

### 6.8.1 Sinkronizacija u TDM sustavima

Vremenska sinkronizacija izvora (pritoka), multipleksora i demultipleksora, uvjet je ispravnosti rada sustava. Sinkronost je moguće osigurati samo na najnižoj razini TDM (G.736, E1, 30+2 x 64 kb/s). Na višim razinama za očekivati je, da signali iz različitih izvora (pritoka) nisu sinkroni i sinfazni (usklađeni frekvencijski i fazno), kako međusobno, tako niti u odnosu na takt multipleksora. Neophodno je dodatno procesiranje signala. U **pleziokronim** (PDH) sustavima dopušta se točnost frekvencije i faze takta izvora u određenim granicama (eng. *clock jitter, wander*). Razlike se kompenziraju dodatnim bitovima (eng. *bit-stuffing*<sup>5</sup>).

Bitovi se dodaju kako bi se ulazna sekvenca sinkronizirala s taktom multipleksora. E2 nazivne je brzine multipleksora 8 Mb/s, a stvarna brzina je 8448 kb/s. Brzine pritoka su po 2048 kb/s, što ukupno iznosi 8192 kb/s. Razlika od 256 kb/s je za pomoćne procese uključujući dodatne bite, te oznake za njihovo brisanje.

E2 okvir (G.742) ima četiri skupine po 212 bita i slijedeće je strukture:

Oznaka početka okvira FAW <sup>6</sup> (1111010000)	1. do 10.
Alarm	11.
Nacionalna primjena	12.
Bitovi pritoka	13. do 212.
Cj1	1. do 4.
Bitovi pritoka	5. do 212.
Cj2	1. do 4.
Bitovi pritoka	5. do 212.
Cj3	1. do 4.
Dopunski bitovi, jedan po pritoku	5. do 8.
Bitovi pritoka	9. do 212.

Tablica 6.2. Struktura E2 okvira

---

<sup>5</sup> In telecommunication, bit stuffing is the addition of a small number of binary digits to a transmission unit in order to fill it up to a standard size or to help synchronize signaling rates between points in a network. The receiver knows how to detect and remove or disregard the stuffed bits. <http://searchnetworking.techtarget.com/>.

<sup>6</sup> Frame Alignment Word

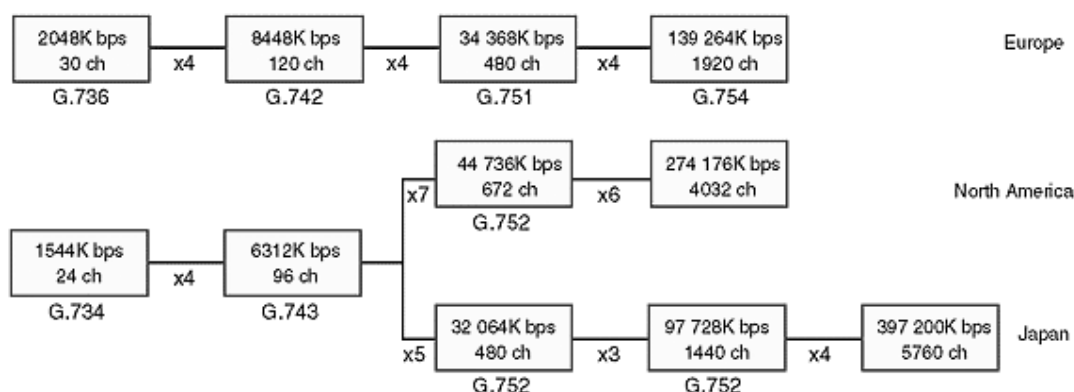
Cj1, Cj2 i Cj3 su po tri bita koji označavaju, da li je tom pritoku bit dodan ili nije. Sekvenca 111 znači da je bit dodan, 000 znači da nije. U slučaju pogreške u prijenosu ova tri bita, odluka je većinska.

Kako je veličina okvira 848 bita, svaki od pritoka ima mogućnost jednog dodatnog bita po okviru, to znači, da je moguće prihvatiti brzine prijenosa od 2038 kb/s do 2048 kb/s (10 kb/s), što zadovoljava dopuštenu točnost takta od  $\pm 30$  ppm.

Njihanje takta je slučajno, broj dodanih bitova će varirati, te je neophodna stalna komunikacija multipleksora i demultipleksora (eng. *justification control bits*).

Različiti su postupci otklanjanja dodanih bitova:

- pozitivni (*positive justification*<sup>7</sup>) - opisani postupak u G.742
- pozitivno-negativni (*positive-negative justification*)
- pozitivno-nula-negativni (*positive-zero-negative justification*)

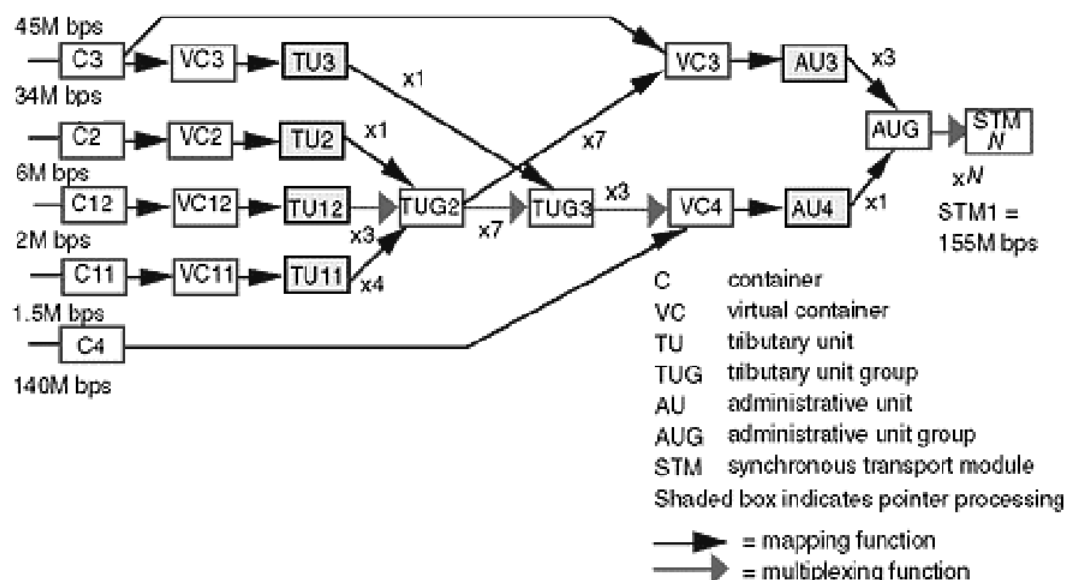


Slika 6.26. Pleziokrone digitalne hijerarhije TDM sustava CEPT, AT&T, NTT

Različitosti i nedostatke triju postojećih PDH sustava prevladao je SDH<sup>8</sup> (synchronous digital hierarchy) sustav začet 1985.g. SDH je definiran preporukom G.707. Koncept SDH složen je, s ciljem da se postigne kompatibilnost E1 i T1 sustava.

<sup>7</sup> **G.742** Second order digital multiplex equipment operating at 8448 kbit/s and using positive justification. <http://www.iec.org/online/tutorials/sonet/topic05.html>

<sup>8</sup> [http://www.tektronix.com/Measurement/App\\_Notes/sdhprimer/2RX\\_11694\\_2.pdf](http://www.tektronix.com/Measurement/App_Notes/sdhprimer/2RX_11694_2.pdf)



Slika 6.27. SDH sustav

Ulaz u SDH sustav je PDH, koji se nadopuni dopunskim bitovima, te se dobije sinkroni signal. Podaci & dopunski bitovi ostaju spakirani u kontejneru (C) sve dok su u SDH mreži. Visoke performanse upravljanja mrežom na razini pojedinačnih kanala osiguravaju se porukom u zaglavlju (*path overhead* POH) koja se dodaje kontejneru, te se tako dobije virtualni kontejner (VC).

Kako bi se i u prostranim mrežama osigurao sinkronizam, poruka u virtualnom kontejneru se poravna (*justification*) te VC postaje pritočna jedinica (*tributary unit* TU). Točna pozicija VC u TU označi se pokazivačem, ugrađenim u TU. Time je omogućeno jednostavno i precizno lociranje VC u složenoj strukturi i, po potrebi, izdvajanje ili zamjena drugim VC-om. TU-ovi vremenski se multipleksiraju u grupe (*Tributary Unit Groups* TUG). Grupe se spajaju u administrativne jedinice (*Administrative Units* AU), a ove pak, tvore sinkroni transportni modul (*Synchronous Transport Module* STM<sup>9</sup>). Jedna AU je STM-1 (155 Mb/s), 4 AU tvore STM-4, sve do STM-64 (10Gb/s).

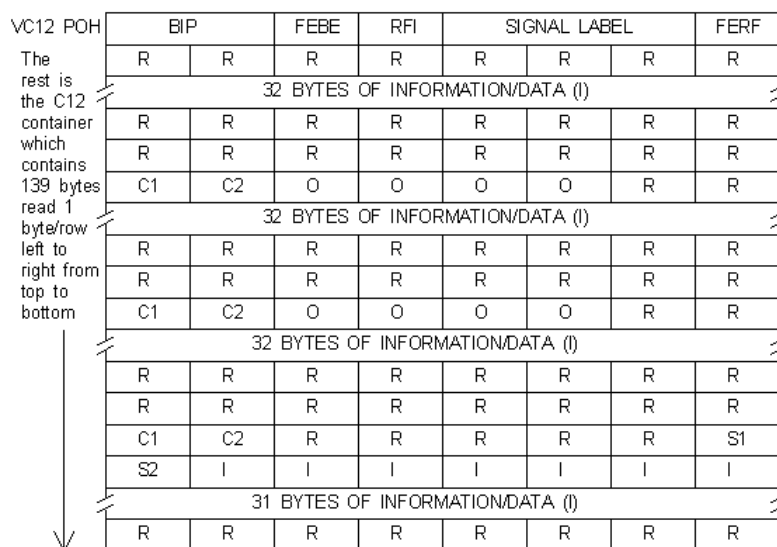
Pogledajmo, kako se grupa E1 (2 Mb/s) “provlači” SDH hijerarhijom (Slika 6.27).

Kao prvo, PDH signal 2 Mb/s ulazi u kontejner C12 u kojem se kompenzira odstupanja brzine prijenosa dopunskim bitovima (R). Način nadopune određuju S1 i S2 a njihov nadziru upravljački biti C1 i C2. Ako su C-biti nule, tada S-bit sadrži podatak, a ako su C-biti jedinice, tada S-bit nije definiran. O označava bitove zaglavlja (*overhead*) kanala, a I -

<sup>9</sup> [http://www.cisco.com/warp/public/127/sonet\\_sdh.html](http://www.cisco.com/warp/public/127/sonet_sdh.html)

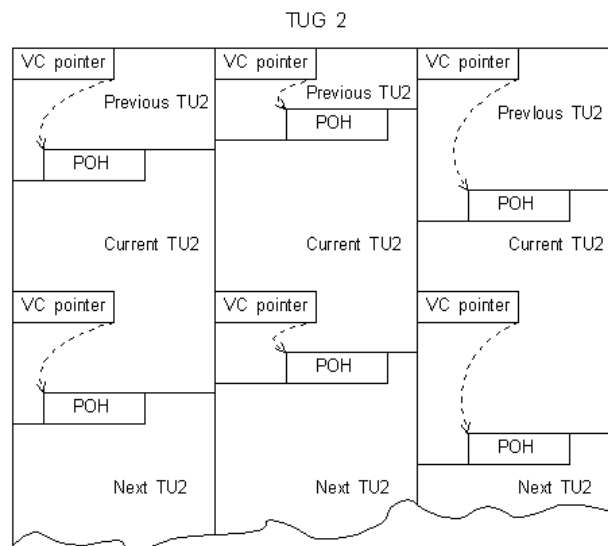
informatijske bitove. Dodatkom zaglavlja staze (path overhead POH) nastaje VC12. U POH pogrešku nadzire paritet prepletenih bita (*Bit Interleaved Parity BIP*). Uz to, u POH je ugrađeno više pokazatelja zapaženih grešaka:

*Far End Block Error* (FEBE), *Remote Fail Indicator* (RFI) i *Far End Receive Failure* (FERF). Oznaka “Signal Label” postavljena je na vrijednost 2 što označava asinkrone podatke.



Slika 6.28. Struktura VC12 i C12

Jitter (iz regeneratora ili multipleksora) i wander (uzrokovan, npr. promjenama temperature prijenosnog medija) utječu na međusobnu “faznu” neusklađenost triju VC12 koji tvore skupinu više razine (TUG2). Da bi se znalo gdje koji VC12 započinje i završava, periodično, u točno određenim trenucima, ubacuju se pokazivači (VC pointer) koji svojom vrijednošću, ukazuju na početak (POH) slijedećeg okvira. Ako se mijenjaju fazni odnosi, mijenjati će se i vrijednost pointera; ako podaci pristižu brže, vrijednost pointera se povećava, a ako podaci pristižu sporije, tada se vrijednost smanjuje. Razlika u brzini može biti do jednog bytea po SDH okviru. Prikazano je, kako se tri TU12 uključuju u TUG2, svaka u različitom trenutku. Pokazivači VC12 pokazuju gdje se nalazi početak (zaglavlje POH) svake od tri Tu12. Tri TU12 vremenski se multipleksira cikličkim preplitanjem byteova, te nastane TUG2. Sedam TUG2 sličnim se postupkom multipleksira u TUG3, a tri TUG3 u VC4. VC4 može sadržati do  $3 \times 7 \times 3 = 63$  kanala po 2 Mb/s.



*Slika 6.29. Pointeri u TUG-2*

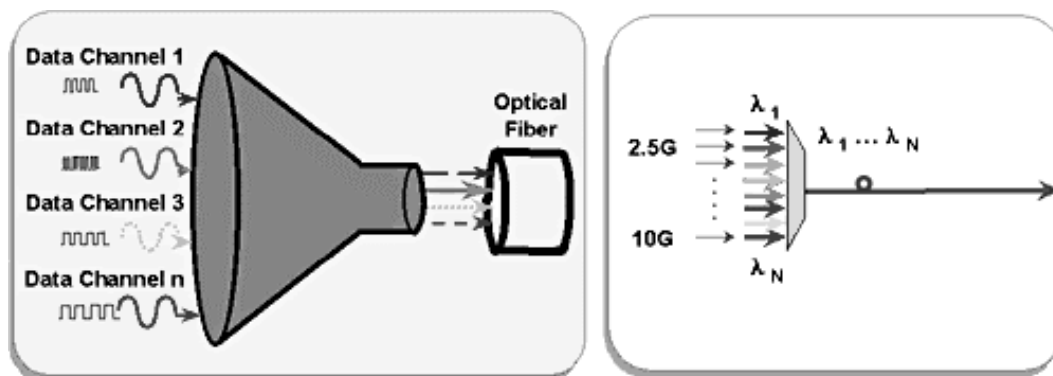
## 6. 9. ***Usporedba TDM i FDM:***

Glavne prednosti TDM u odnosu na FDM su:

- jednolikost karakteristika kanala (digitalizacija);
- jednostavnije kaskadno povezivanje i fleksibilnije konfiguriranje;
- kompatibilnost (sklad) s digitalnom komutacijom;
- kompatibilnost s digitalnim izvorima (računalima);
- provjera i ispravljanje pogrešaka (digitalni prijenos);
- pogodnost digitalnih signala, sklopova i uređaja za integraciju (VLSI tehnologija);
- kompaktnije izvedbe, manja potrošnja energije, jeftinije.

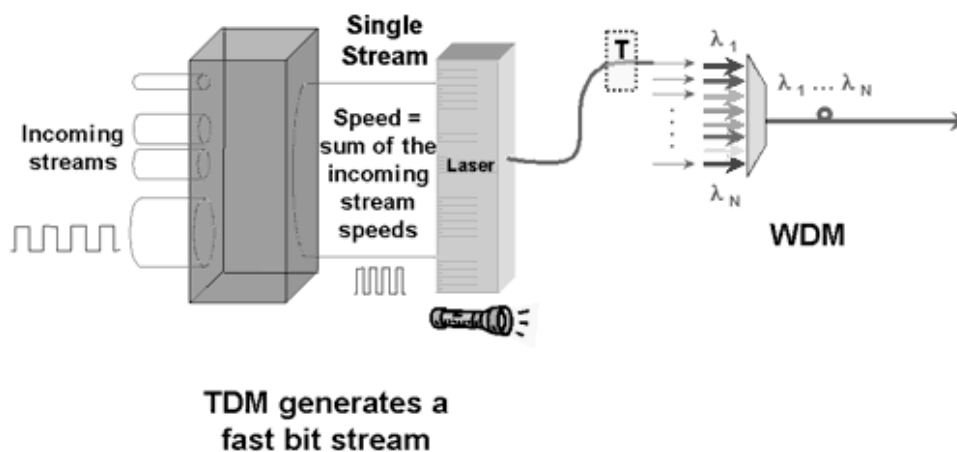
## 6. 10. Multipleks valnih duljina WDM

Za WDM<sup>10</sup> *Wavelength Division Multiplex*, može se reći kako je to povratak FDM na komunikacijsku scenu ali, kako se radi o digitalnim optičkim sustavima i elektromagnetskim a ne električnim signalima, to se WDM razmatra kao nova tehnologija multipleksiranja.



Slika 6.30. Ideja multipleksa valnih duljina

Elektronička tehnologija podržava TDM do brzina prijenosa reda 10 Gb/s. Više takvih TDM signala optički se multipleksira tako što se svakom od njih pridjeljuje druga “boja” - valna duljina lasera. Po jednoj optičkoj niti ih je do 160, što omogućava prijenos do 1,6 Tb/s. U optičkom kabelu više je niti, npr. 48. Ukupno to iznosi 76,8 Tb/s<sup>11</sup>.



Slika 6.31. Kombinacija TDM i WDM

<sup>10</sup> <http://www.rs-kabel.hr/novosti/elinst34.htm>

<sup>11</sup> Today's DWDM systems are capable of sending up to 160 parallel wavelengths and up to 80 Gbps per wavelength. [http://www.xilinx.com/esp/optical/net\\_tech/dwdm.htm](http://www.xilinx.com/esp/optical/net_tech/dwdm.htm)



## 6. 11. Pulsno kodna modulacija PCM

U digitalnim komunikacijskim sustavima, govorni signal se digitalizira postupkom tzv. pulsno kodne modulacije:

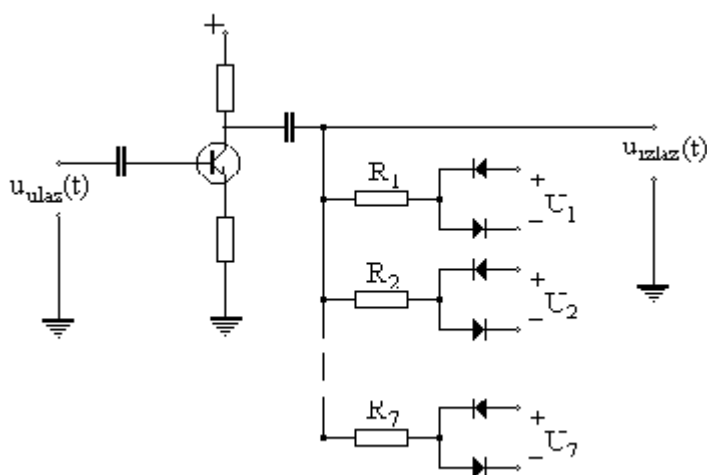
Frekvencija sempliranja	8 kHz.
Kvantiziranje, neravnomjerno po	A-zakonu (Europa) ili $\mu$ - zakonu (Amerika).
Kodiranje	8 -bitno.

Poznato je (provjereno na laboratorijskim vježbama):

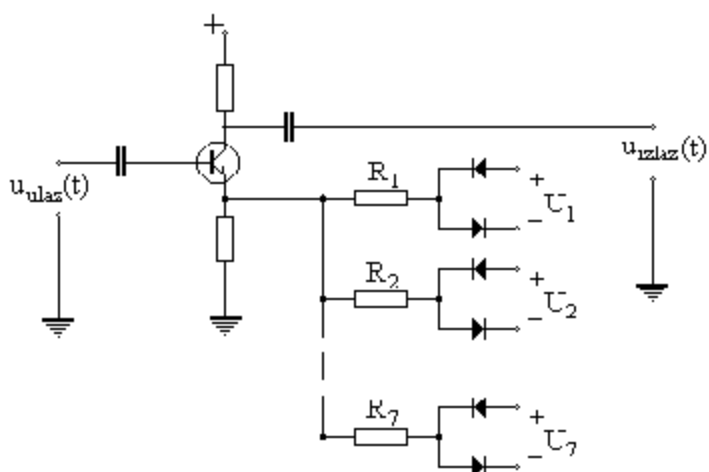
- govorni signal nema ravnomjernu razdiobu trenutačnih vrijednosti;
- vjerojatniji su uzorci govornog signala malih vrijednosti;
- snaga šuma kvantiziranja ovisi o kvantizacijskom koraku  $\Delta$ .

Slična ideja kao i u slučaju neravnomjernog kodiranja dala bi A/D pretvarač, kod kojega bi vjerojatnije (male) uzorke govornog signala kvantizirali s malim korakom  $\Delta_{\min}$ , jače uzorke s većim  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3 \dots$  do najjačih uzoraka i koraka  $\Delta_{\max}$ .

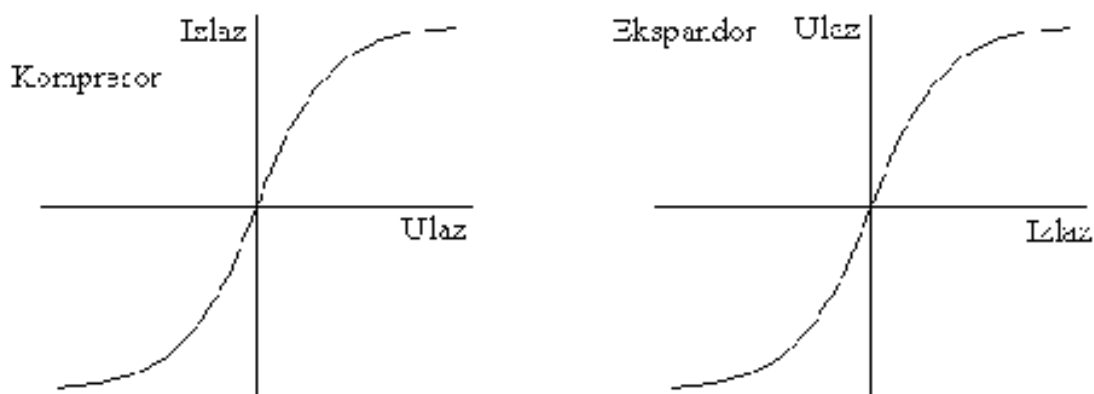
Takav A/D pretvarač bio je nepraktične izvedbe u vrijeme cijevne i diskretne tranzistorske tehnologije. Umjesto toga, primijenjen je par sklopova, **kompresor** i **ekspandor**, koji su modificirali govorni signal tako da mu statistika (histogram, razdioba trenutačnih vrijednosti) postane bliža ravnomjernoj razdiobi.



Slika 6.32. Shema kompresora signala



Slika 6.33. Shema ekspandora signala

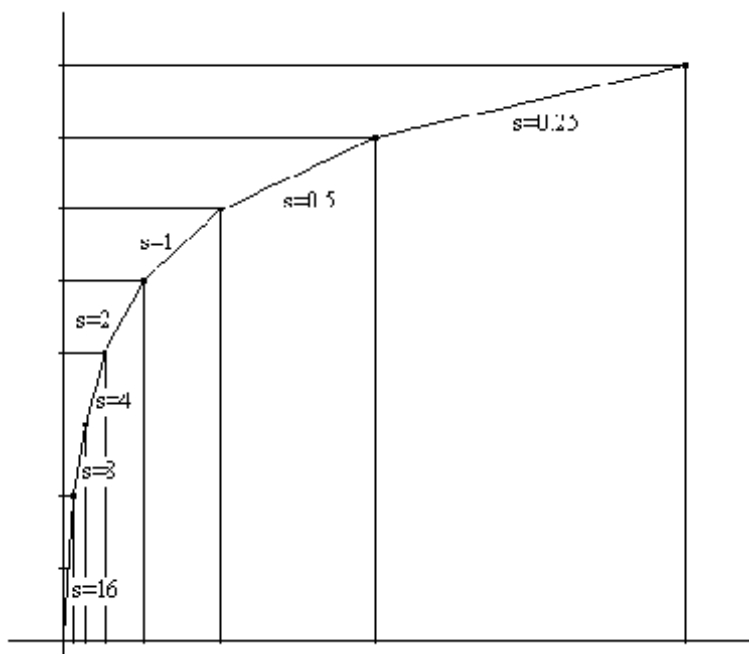


Slika 6.34. Nelinearne karakteristike kompresora i ekspandora

$$y = \begin{cases} \frac{A}{1 + \ln A} x & \text{za } 0 \leq x \leq \frac{A_{\max}}{A} \\ \frac{A_{\max}}{1 + \ln A} \left[ 1 + \ln \left( \frac{A}{A_{\max}} x \right) \right] & \text{za } \frac{A_{\max}}{A} \leq x \leq A_{\max} \end{cases} \quad (6.21.)$$

Gdje je  $A=87,6$ . Kvantizacijski se koraci mijenjaju po segmentima:

$$\frac{\Delta_i(L+1)}{\Delta_i(L)} = \begin{cases} 1 & L = 0 \\ 2 & L \in (1, 2, 3, \dots, \Lambda - 2) \end{cases} \quad (6.22.)$$



Slika 6.35. Karakteristika kompresora prema A-zakonu A(87,6/13)