

Fizički sloj

Računarske mreže i mrežne tehnologije
Mart 2015. god.



Institut za
matematiku i informatiku
Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Kragujevcu



Sadržaj

- Teorijske osnove prenosa podataka
- Fizički medijumi
- Bežični prenos podataka
- Satelitski prenos podataka
- Lokalne veze, modemi, ADSL, CATV
- Vodovi i multipleksiranje

Furijeova analiza

Svaka normalna periodična f-ja periode $T=1/f$ može da se predstavi kao Furijeov niz:

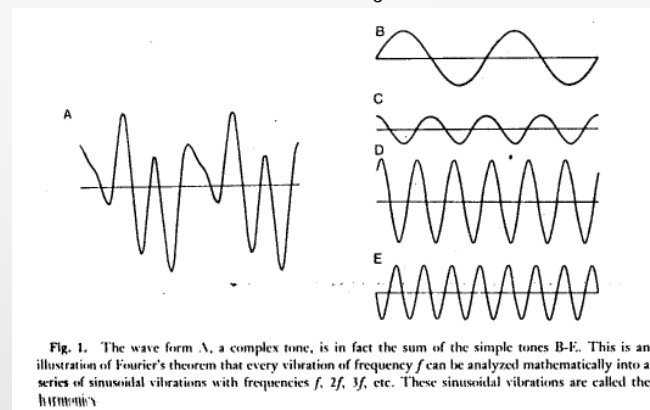
$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

Svaka amplituda a_k se može izračunati množenjem obe strane jednačine sa $\sin(2\pi kft)$, a zatim integrisanjem cele jednačine u intervalu $(0, T)$. Pošto je:

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0, & \text{za } k \neq n \\ 1, & \text{za } k = n \end{cases}$$

Posle integracije preostaje samo jedan član a_k . Zbir sa amplitudom b_n potpuno iščezava.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$



Uticaj ograničenog propusnog opsega

Slanje ASCII kodiranog slova "b" - 01100010.

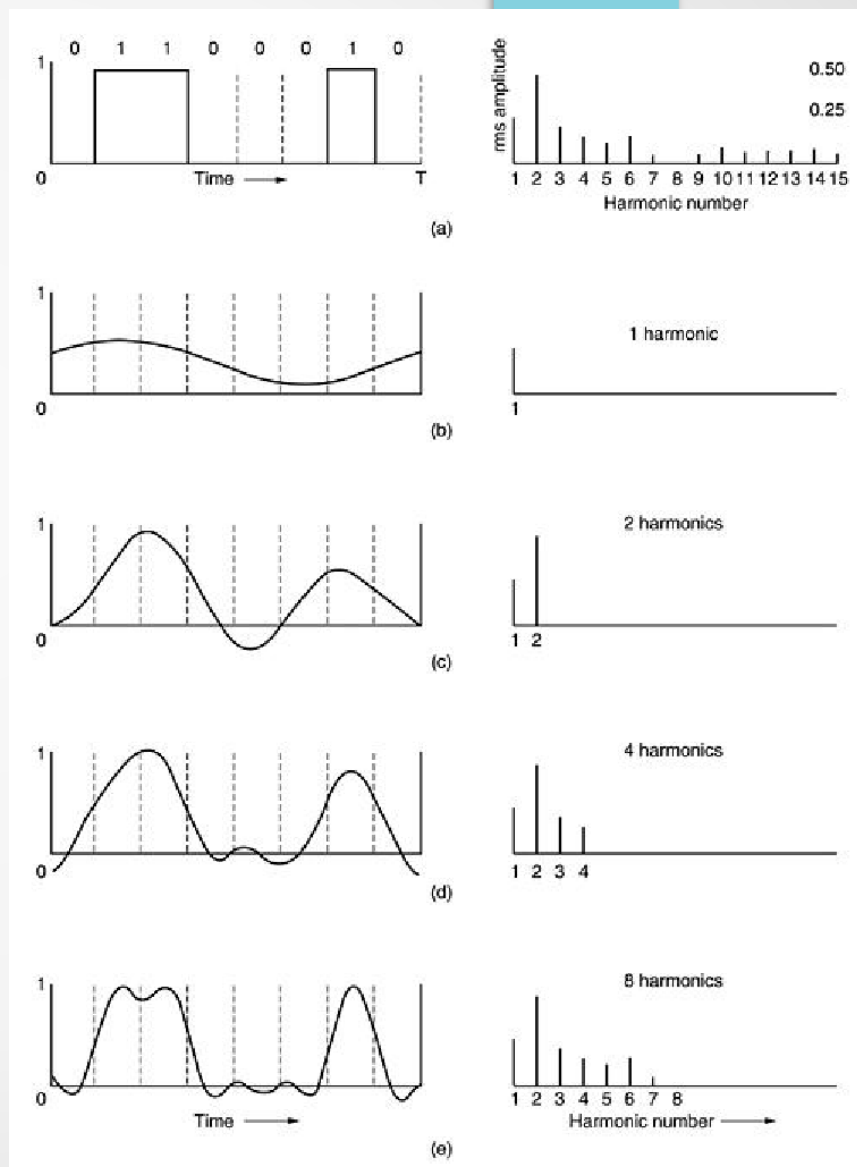
Furijeovi koeficijenti iznose:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(3\pi n/4) - \cos(\pi n/4) + \cos(7\pi n/4) - \cos(6\pi n/4)]$$

$$c = \frac{3}{4}$$

- Različite komponente Furijeovog niza imaju različit stepen slabljenja
- **Propusni opseg** je opseg grekvencija koje se prenose bez većeg slabljenja ($0..f_c$)
- Telefonska linija ima propusni opseg od oko 1MHz, ali ograničen od strane tel. kompanija na 3100Hz zbog smanjenja opterećenja
- <http://phet.colorado.edu/en/simulation/fourier>
- <http://www.falstad.com/fourier/>



Šta se dobija na drugom kraju tel. linije?

- Zadata brzina prenosa od b bitova u sekundi
- Propusni opseg tel. linije je $\sim 3000\text{Hz}$
- Da bi se preneo jedan znak, potrebno je 8 bitova. To traje ukupno $T=8/b$ sekundi, tj. frekvencija prvog harmonika je $f=b/8$ Hz.
- Dakle, može se preneti ukupno $3000/(b/8)=24000/b$ harmonika
- Tabela prikazuje koliko je harmonika moguće preneti pri različitim brzinama b

Bps	T (msec)	First harmonic (Hz)	# Harmonics sent
300	26.67	37.5	80
600	13.33	75	40
1200	6.67	150	20
2400	3.33	300	10
4800	1.67	600	5
9600	0.83	1200	2
19200	0.42	2400	1
38400	0.21	4800	0

Nikvistova teorema

- **Nikvistova teorema (1924. godine):** Signal koji prolazi kroz filter propusnog opsega H može se u potpunosti rekonstruisati ako se uzorkuje frekvencijom od $2H$ uzoraka u sekundi.
- **Posledica:** Ako se signal sastoji od V diskretnih naponskih nivoa, najveća brzina prenosa kroz kanal je:

$$U_{max} [b/s] = 2H \log_2 V$$

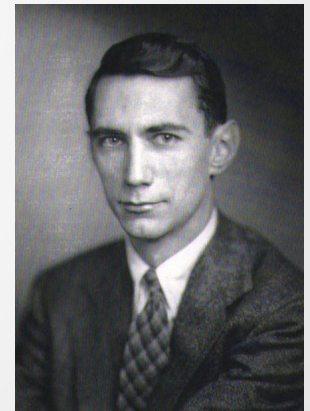


- Nikvistova teorema se odnosi na bešumne kanale!
- Na primer, bešumni kanal propusnog opsega 3kHz ne može da prenosi binarne signale brže od 6000 b/s.

Šenonova teorema

- Na realnim medijumama se javlja termalni šum koji se definiše odnosom S/N (*Signal to Noise ratio*)
- Obično se izražava u decibelima kao $10 \log_{10}(S/N)$.
- Osnovni rezultat Šenonovog rada je jednačina:

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



- **Primer:** Ako imamo kanal propusnog opsega 3kHz i medijum sa odnosom signala i termičkog šuma od 30dB, brzina prenosa neće moći da ide preko 30kbps, bez obzira na broj naponskih nivoa.

Fizički medijumi za prenos podataka

- Upredena parica
- Koaksijalni kabl
- Optičko vlakno

Upredena parica

- Do 1988. godine tipično ožičenje poslovnih zgrada je bilo standardom UTP-3 (16MHz)
- Posle 1988. koristi se standard UTP-5 (100MHz)
- Danas postoje i kategorije 6 (250MHz), odnosno 7 (600MHz)

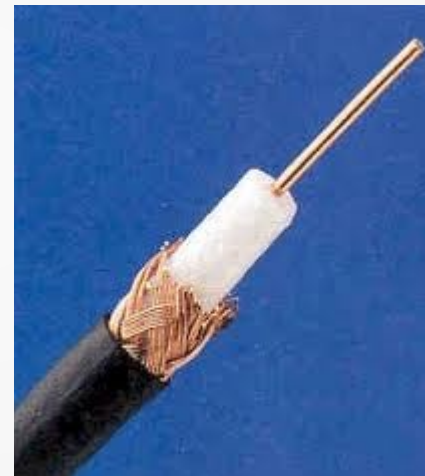
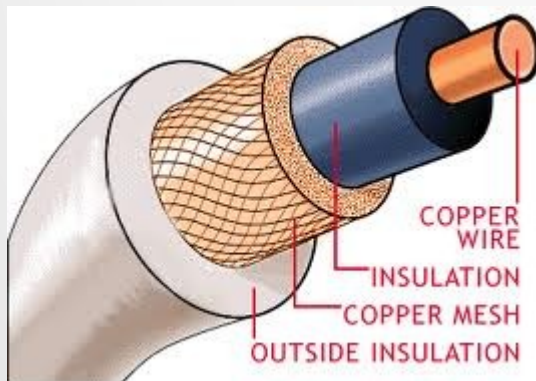


Figure 2-3. (a) Category 3 UTP. (b) Category 5 UTP.



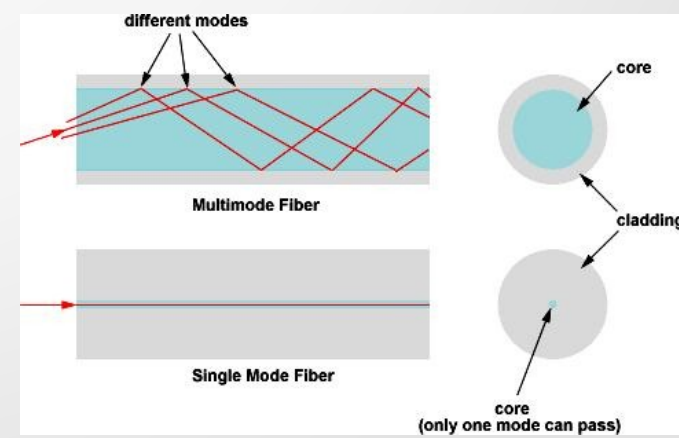
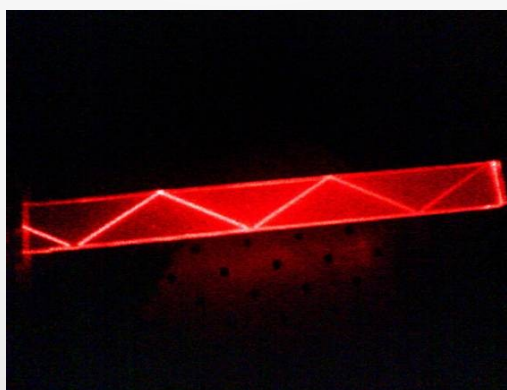
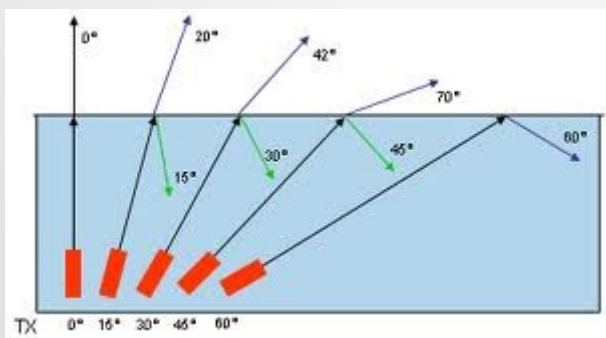
Koaksijalni kabl

- Koriste se dve vrste - 50-omski i 75-omski
- Propusni opseg od ~1GHz



Optičko vlakno

- Računari su od 1981. godine do 2013. ubrzani sa 4.77MHz do 3GHz, dakle oko **600 puta**
- U istom periodu, mreže su prešle put od 56kbps (ARPANET) do 273 Gbit/s (NEC, 2011. god.), tj. **5 miliona puta!**
- Rade na principu totalne refleksije
- Postoji višerežimsko i jednorežimsko vlakno

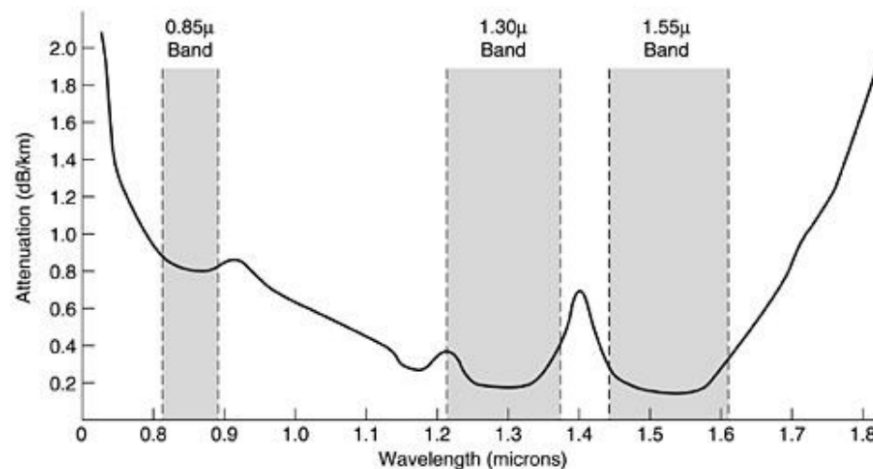


Prolazak svetlosti kroz opt. vlakno

- Atenuacija po dužnom kilometru vlakna se može izraziti kao:

$$\text{Atenuacija [dB]} = 10 \log_{10} \frac{\text{propuštena snaga}}{\text{ulazna snaga}}$$

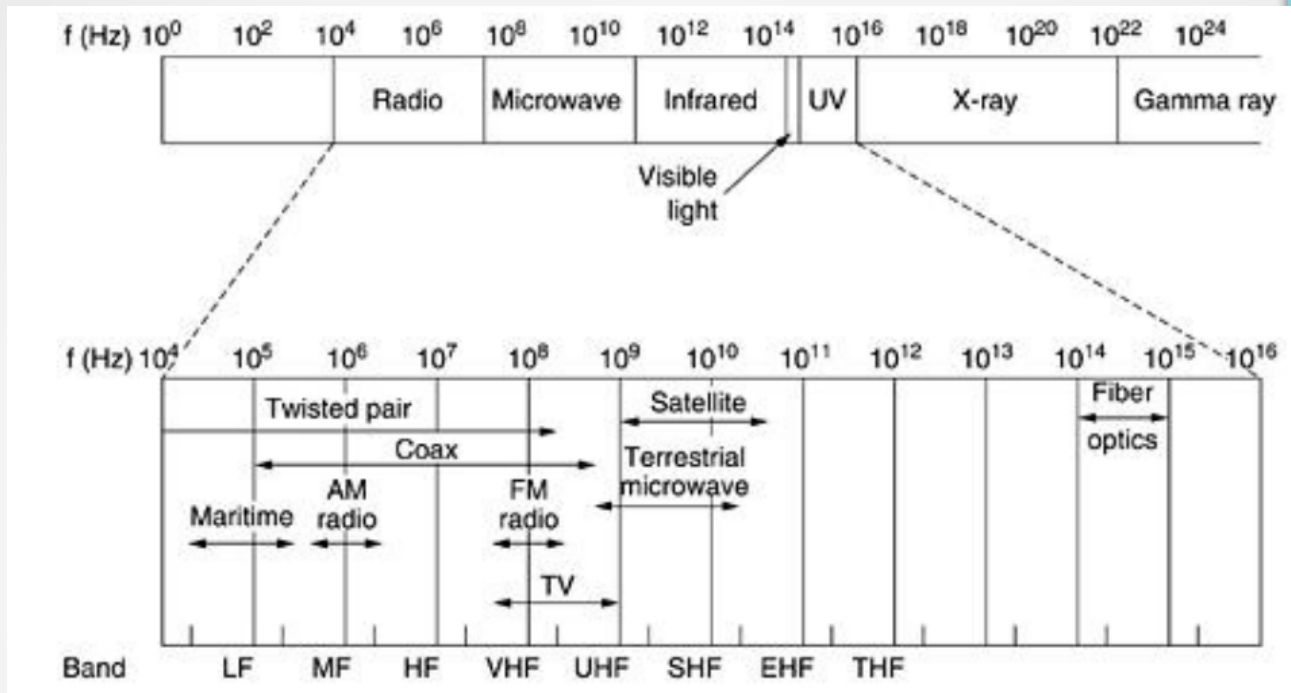
- Za optičke komunikacije se koriste tri uska područja, 0.85, 1.30 i 1.55 μm
- Sva tri područja su širine 25-30THz
- Javlja se **hromatska disperzija** (rasipanje) jer impulsi različitih talasnih dužina napreduju različitom brzinom kroz vlakno



Poređenje opt. vlakna i bakarne žice

- Zbog male atenuacije, repetitori se postavljaju tek na svakih 50km, dok kod bakarne žice moraju da se postave na svakih 5km
- **Neosetljiva su** na naponske udare, EM smetnje
- **Tanka su i laka.** 1000 upredenih parica ima masu od 8t, dok dva vlakna imaju masu od samo 100kg, a mnogo veći kapacitet
- **Sigurnost.** Ne može se “zakačiti” na opt. kabl
- **Mane:** Cena opreme i neotpornost na savijanje

Bežični prenos podataka – EM spektar



- f -frekvencija
- λ -talasna dužina
- c -brzina svetlosti
- **Primer:** Talas od 100MHz ima talasnu dužinu od 3m

$$\lambda f = c$$
$$\lambda f \approx 300 \quad \text{ako je frekvencija u MHz, a talasna dužina u metrima}$$

Poređenje brzina prenosa

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \Rightarrow \Delta f = -\frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2}$$

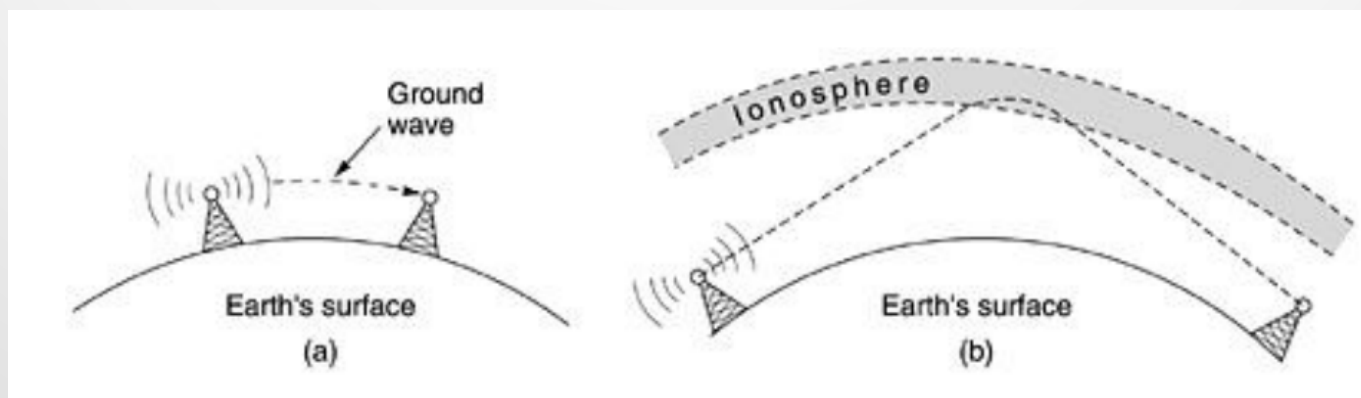
Obično je

$$\Delta f \ll f$$

- Što je šire područje $\Delta\lambda$, veće je i Δf , pa je prenos brži
- **Primer 1:** Coax propusnog opsega 750MHz uz kodiranje od 8b/Hz može da prenese i nekoliko Gb/s
- **Primer 2:** Opt. kabl koji radi na području od 1.30 μm sa opsegom od $\Delta\lambda=0.17\mu\text{m}$, ima propusni opseg od 30THz, što znači da može da radi na brzini od čak 240Tb/s!!!

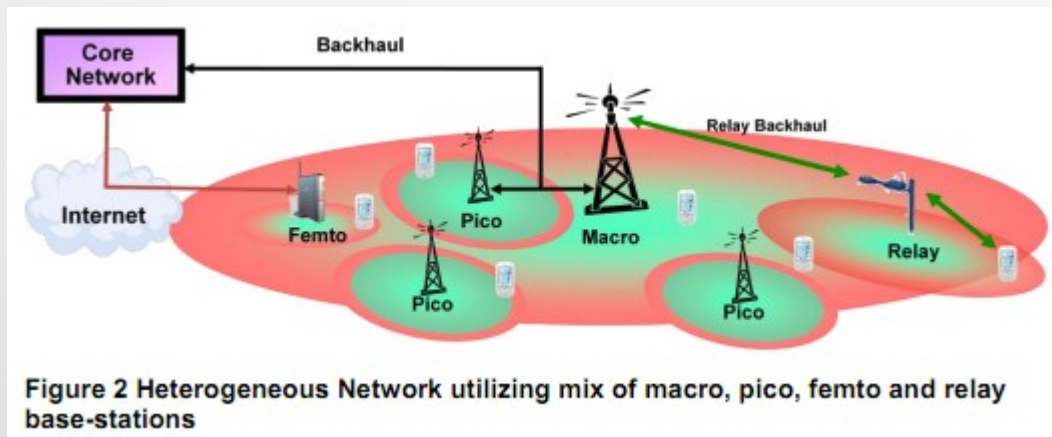
Prenos podataka radio-talasima

- Difuzno se šire, svojstva zavise od frekvencije
- **Niže frekvencije:** lako prolaze kroz prepreke, ali im snaga naglo opada sa rastojanjem od izvora. Prate krivinu Zemlje (VLF, LF, MF, slika levo)
- **Više frekvencije:** teže da se prostiru pravolinijski i da se odbijaju od prepreka. Odbijaju se od jonosfere (HF, VHF, slika desno)



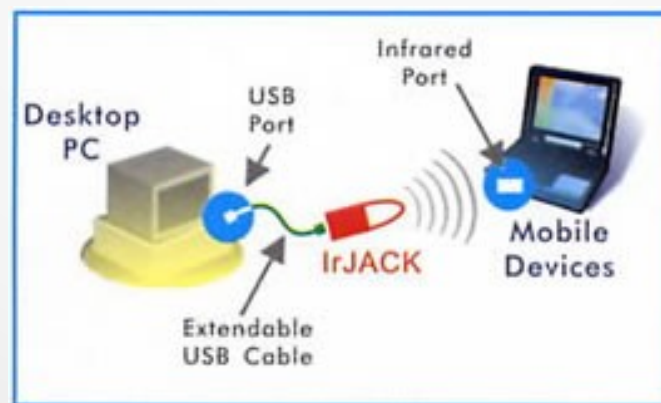
Prenos podataka mikrotalasima

- Iznad frekvencije od 100MHz talasi se prostiru skoro pravolinijski i zato se mogu fokusirati recimo pomoću parabolične antene
- Koristio se pre optičkih kablova kao srž telefonskih komunikacija na velikim rastojanjima
- Tornjevi visine 100m postavljali su se na svakih 80km
- Jeftinije je kupiti malu parcelu na svakih 80 km nego plaćati pravo prolaska opt. Kabla celom dužinom
- **PROBLEM:** *Multipath fading* (slabljenje zbog različitih putanja)
- **PROBLEM:** Talase ~4GHz (santimetasko područje) apsorbuje kiša
- **PROBLEM:** Ponestalo je slobodnih frekvencija (3 algoritma za izbor)



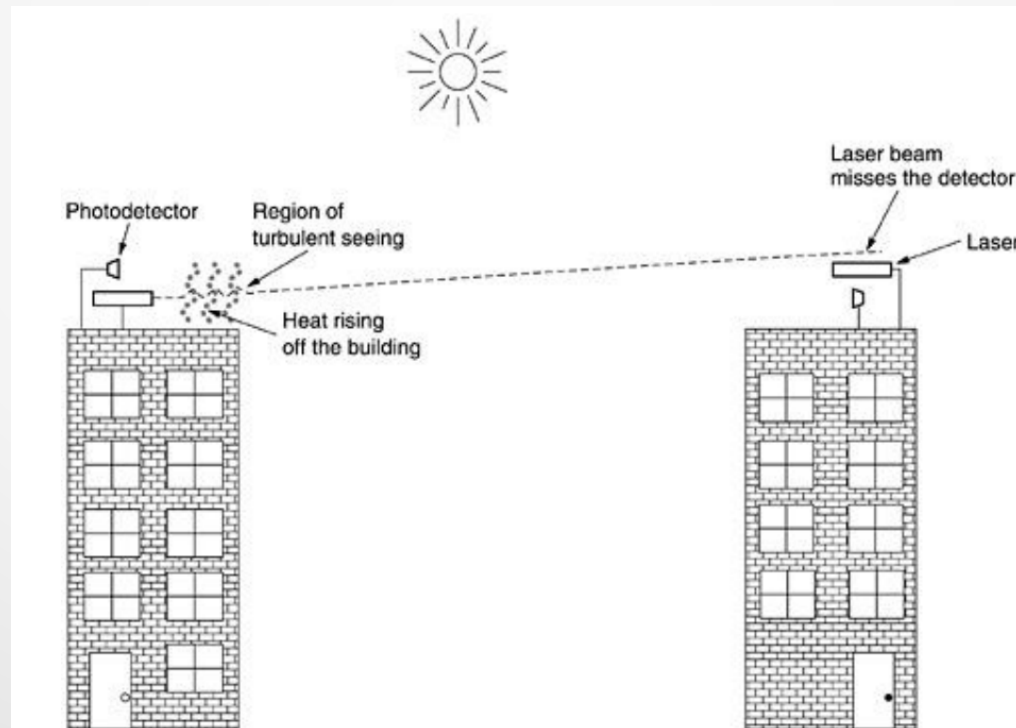
Infracrveni i milimetarski talasi

- Sve se više **ponašaju kao svetlost**, a manje kao radio-talasi
- Daljinski upravljači TV-a i ostalih uređaja
- Loše prolaze kroz prepreke, slab domet, što poenkad i nije loše sa stanovišta sigurnosti
- Vrlo ograničena sfera primene



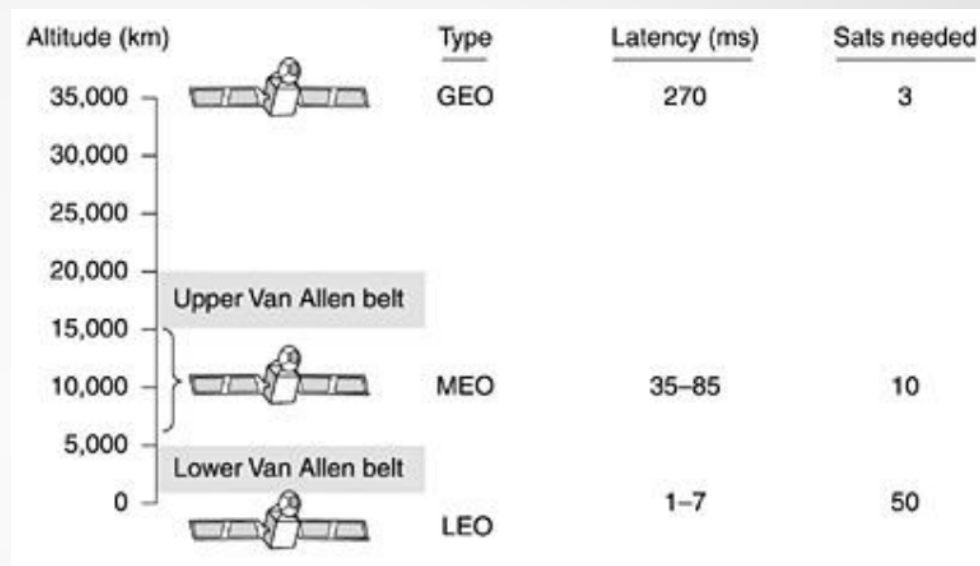
Prenos podataka vidljivom svetlošću

- **Laserska svetlost** se može vrlo dobro fokusirati
- Problem je što se mora vrlo precizno ciljati fotodetektor
- Problem takođe predstavljaju i atmosferske struje koje utiču na skretanje zraka



Komunikacioni sateliti

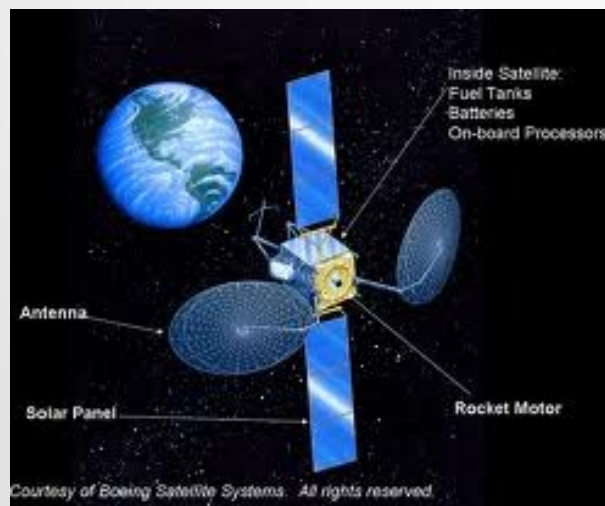
- 1950-ih godina su vršena ispitivanja sa “stalnim meteorološkim balonima” i odbijanjem signala od površine Meseca
- Telekomunikacioni satelit ne samo što može da repetira signal, već i **da ga pojača**
- Sastoji se od više (oko 40) **transpondera** od kojih je svaki zadužen za određeni deo EM spektra
- Može da emituje u širokom snopu ili strogo fokusirano (**režim savijene cevi – bent pipe**)
- **III Keplerov zakon** – Period obilaska je proporcionalan poluprečniku orbite na stepen $3/2$ ($T \sim R^{3/2}$). U blizini Zemljine površine $T=90\text{min}$, na 35800km jedan dan. Koliki je period na 384000km od Zemlje?
- Što kraći period obilaska – više ih je potrebno
- Van Alenovi pojasevi se sastoje od naelektrisanih čestica pa u njima nije moguće postavljanje satelita



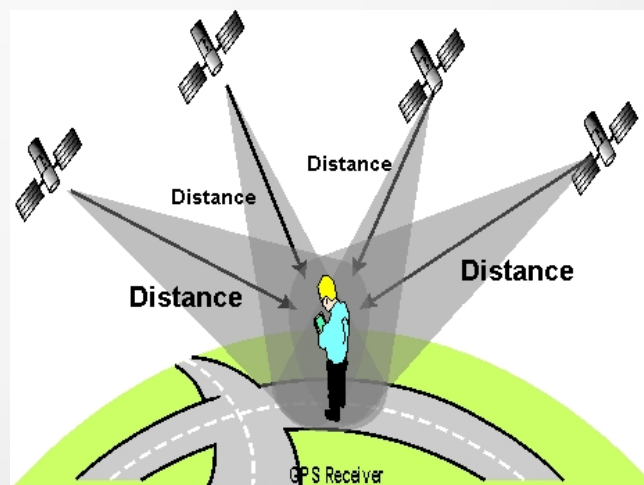
Prvi telekomunikacioni satelit
Telstar, 1962. godina

Poređenje satelitskih i optičkih veza

- Problem kašnjenja signala sa GEO satelitima (250-300ms)
- Jedno optičko vlakno ima veću prousnu moć od svih ikada lansiranih satelita. Međutim, taj opseg je za većinu korisnika nedostupan
- Mobilne komunikacije – kombinacije baznih stanica i optike
- Primene za difuzno emitovanje – satelit je bolja solucija. Zašto?
- Komunikacije na ruralnom i negostoljubivom terenu (npr. Indonezija, hiljade ostrva)
- Kada je dobijanje prava prolaska teško ili preskupo
- Ako je potrebno da se sistem komunikacije brzo uspostavi, kao u ratu



Tipičan GEO satelit



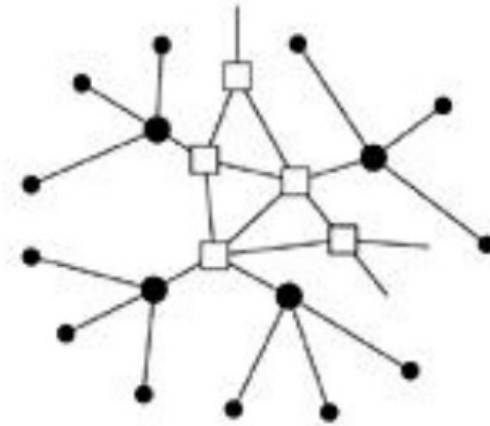
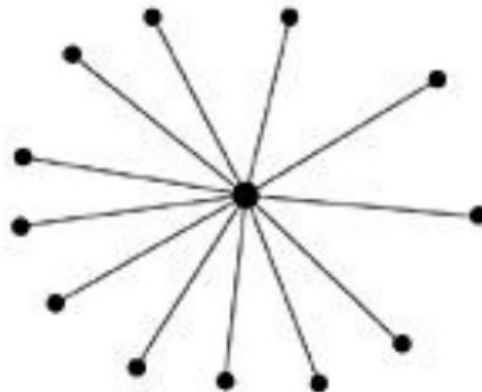
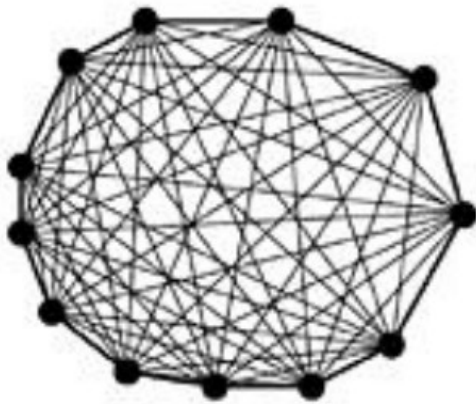
GPS sistem pozicioniranja (MEO orbita)



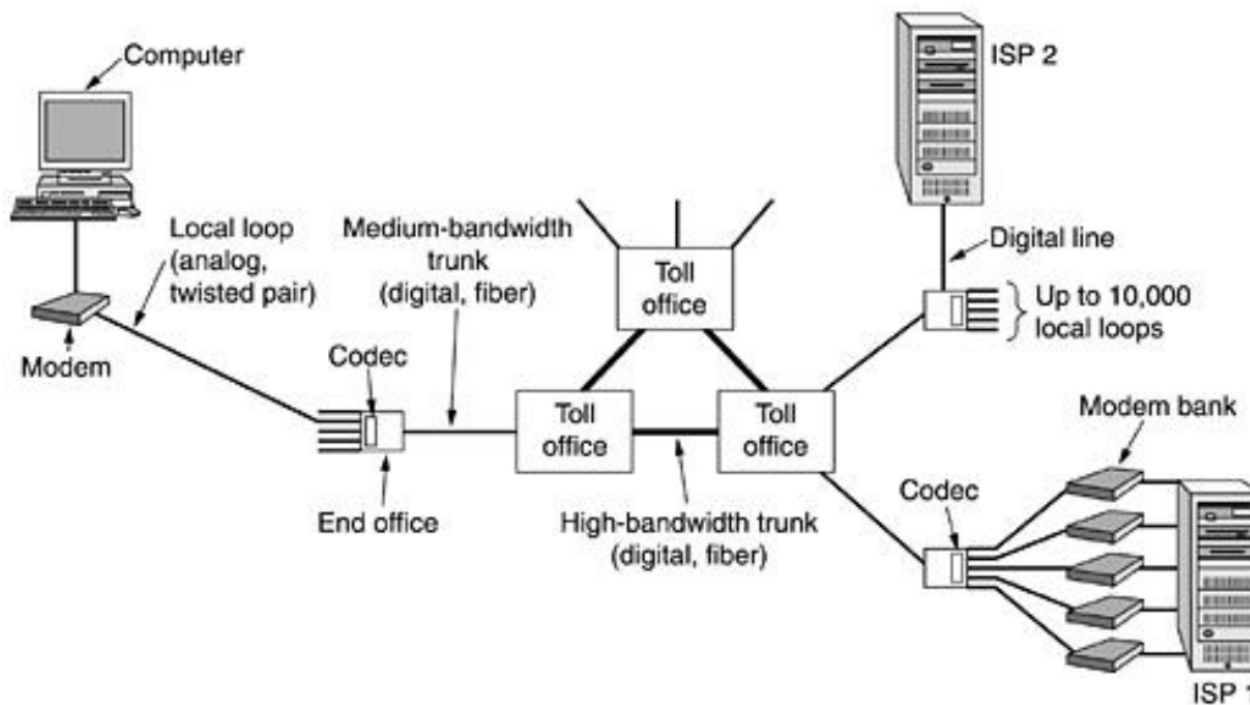
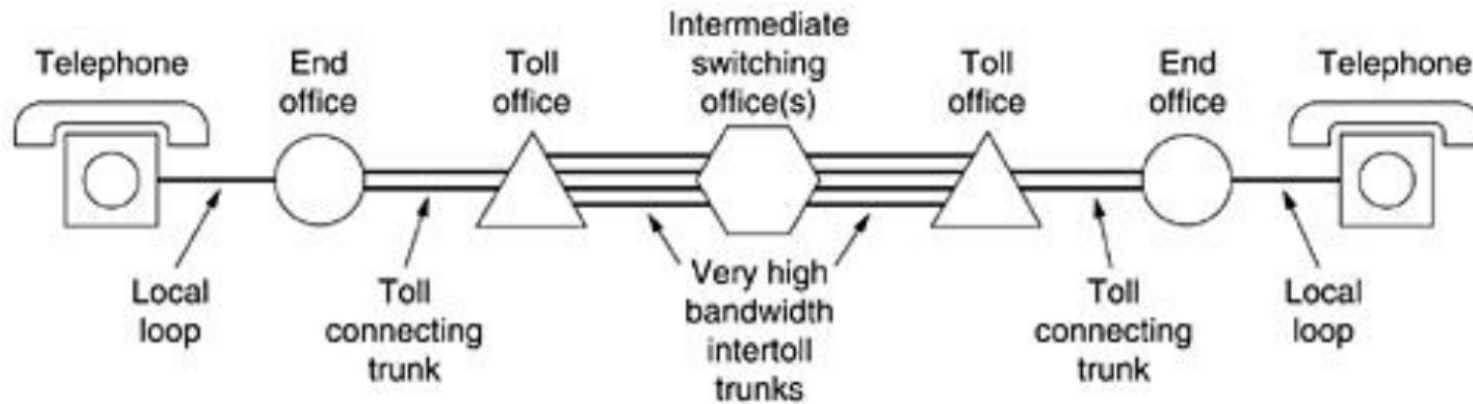
Javna komutirana telefonska mreža

Javna komutirana telefonska mreža

- Bel 1876. patentirao telefon
- **Osnovna namena: prenos ljudskog glasa**
- Sastoji se od lokalnih linija, telefonskih kablova (danas optičih) i centrala
- Na slici je prikazan razvoj telefonske mreže kroz istoriju
- Hijerarhija ide sve do petog nivoa
- Lokalne linije (up. parice), regionalni vodovi (dig. optika) i centrale



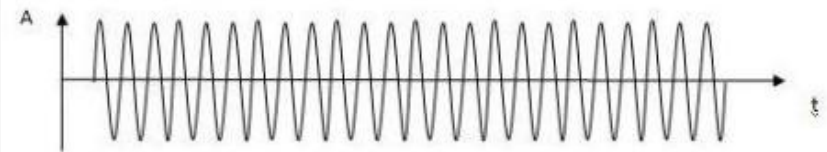
Analogno-digitalna veza



Modemi

- Različito slabljenje (atenuacija) po frekvencijama ima za posledicu **izobličenje** signala
- Prisutan je i EM i termički **šum**
- Zbog svega toga, talasi pravougaonog oblika nisu pogodni za prenos
- Zato se uvodi **noseći sinusni talas** frekvencije 1-2kHz, koji se modulira **amplitudno, frekventno ili fazno**
- Modem (MODulator/DEModulator)
- Nije potrebno da uzorkuju više od 6000 puta u sekundi. Zašto?
- U praksi svi modemi uzorkuju 2400 puta u sekundi (*baud-a*)
- Razlikuje se samo broj bitova po uzorku

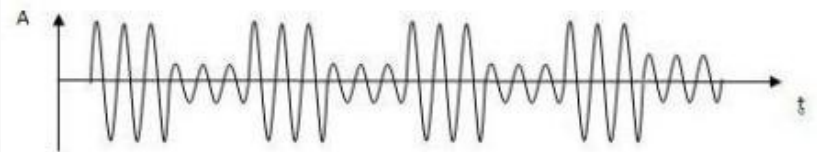
RF wave un-modulated:



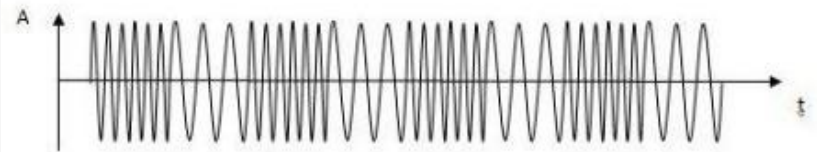
Modulated,

ASK: (amplitude manipulation)

1 0 1 0 1 0 ...



FSK: (frequency manipulation)



PSK: (phase manipulation)

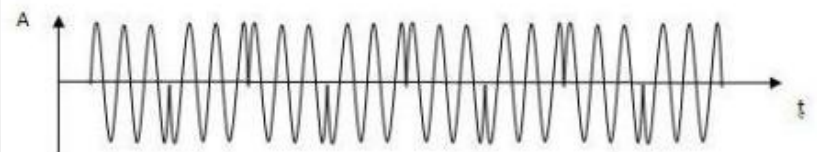
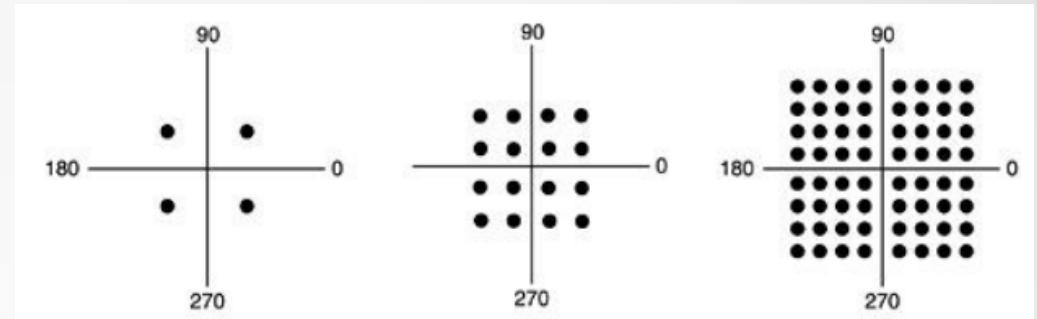


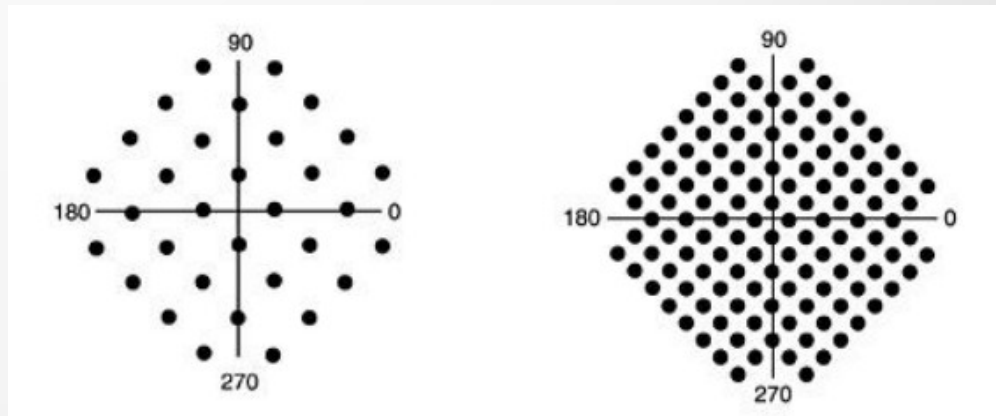
Fig. 2. (A – amplitude, t – time)

Modemi-nastavak

- Tokom svakog *baud*-a šalje se po jedan **simbol**
- Četiri fazna pomaka-2 bita (*Quadrature Phase Shift Keying-QPSK*)
- Kombinacija amplitudne i fazne modulacije (*Quadrature Amplitude Modulation-QAM*)
- Konstelacioni dijagrami
- QAM-16, QAM-64 (9600bps), QAM-128 (14.4kbps), V.34bis (14 bitova po simbolu, 33.6kbps)
- 33.6kbps je Šenonova granica kada se uzme u obzir odnos signala i šuma. Kako je moguće da se V.90 standardom postižu brzine od 56kpbs?



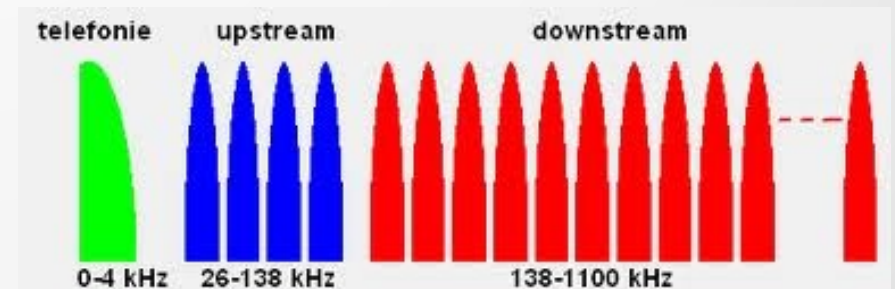
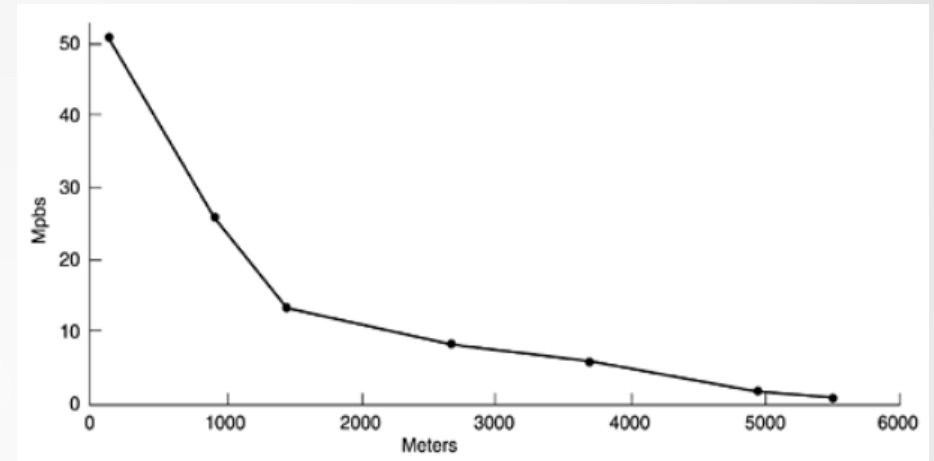
QPSK, QAM-16, QAM-64



V.32 sa 9600bps, V.32bis sa 14.400bps

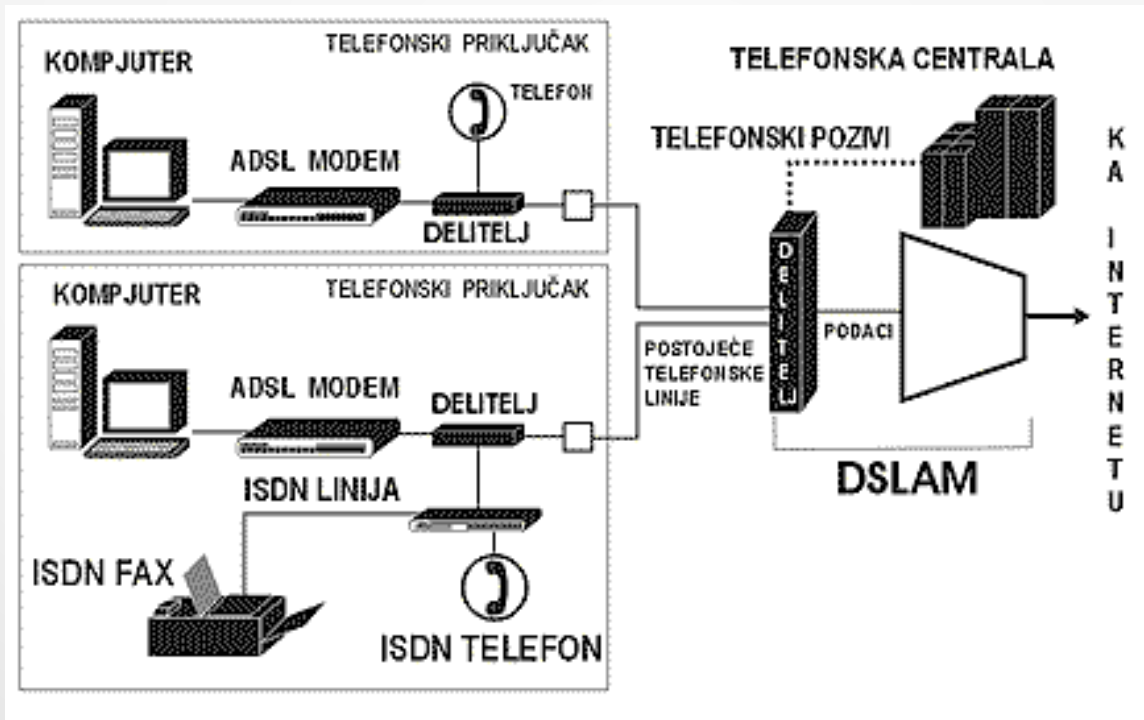
ADSL linije

- *Digital Subscriber Line* (Digitalna pretplatnička linija)
- *A-Asynchronous*
- Skida se veštačko ograničenje linije na 3.1kHz
- Popunjava se propusni opseg sve do 1.1MHz sa 256 nezavisnih kanala po 4.3kHz
- DMT (*Discrete MultiTone*) sistem
- 0-POTS, 1-5 razdvajanje, 2 za kontrolu, ostaje 248 kanala od po 4kHz za podatke
- Na svakom kanalu koristi se QAM-16 sa 15 bitova po *baud*-u, tj. $4000 \cdot 15 = 60\text{kbps}$ po kanalu
- Nejednak broj kanala po smerovima ka korisniku i od korisnika



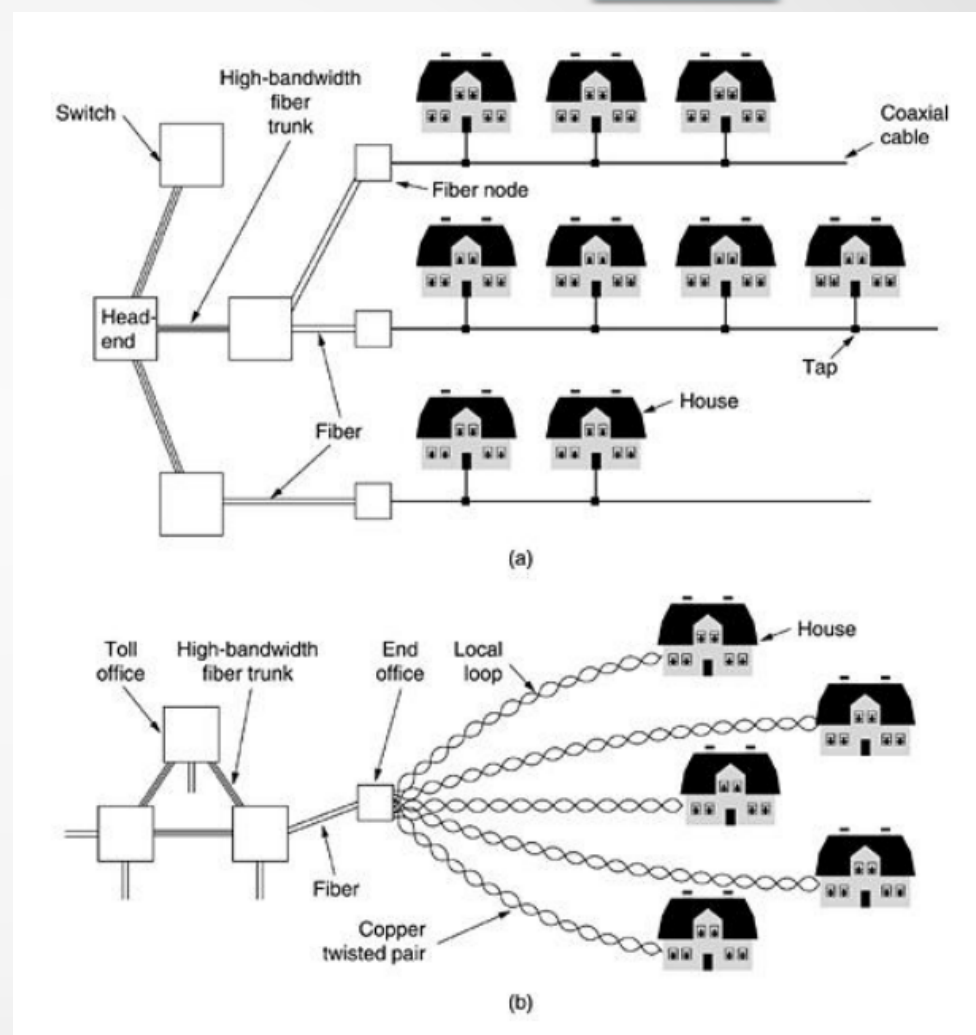
Tipičan ADSL sistem

- DSLAM – *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*
- Obavezni deo je **splitter** koji razdvaja POTS kanal od ostalih kanala za podatke



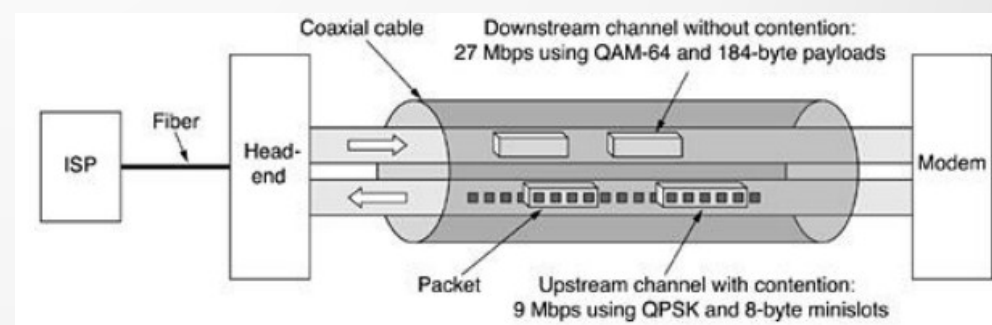
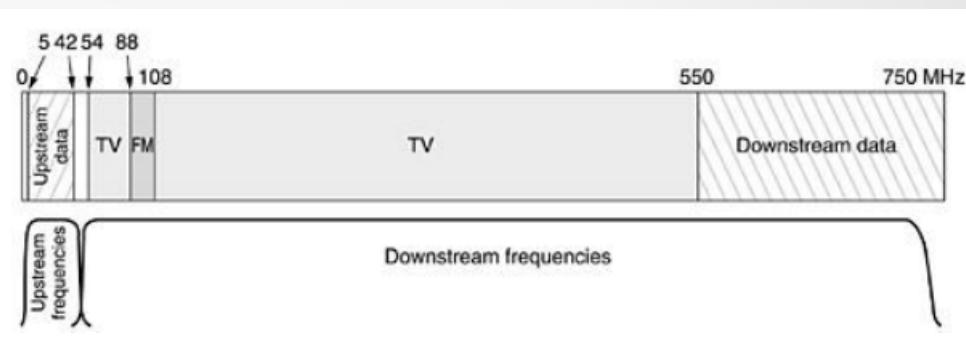
Prenos podataka kablovskom mrežom

- **HFC**-Hibridni optičko-koaksijalni sistem (*Hybrid Fiber Coax*)
- Najveća razlika u odnosu na ADSL je podela opsega koaksijalnog kabla između grupe korisnika
- Na taj način, postaje nešto teže garantovati svakom korisniku pojedinačno propusni opseg
- Rešenje je ugradnja dodatnih optičkih čvorova



Podela propusnog opsega kod CATV

- Za prenos podataka koriste se dva opsega, **5-42MHz za *upstream*** i **550-750MHz za *downstream***
- Zbog smetnji sa CB radija u *upstream* opsegu se koristi **QPSK** modulacija (2 bita po *baud*-u)
- U *downstream* opsegu se koristi **QAM-64** ili **QAM-256** modulacija na kanalima širine 6 ili 8MHz
- Recimo, uz širinu kanala od 6MHz i QAM-64 dobija se 36Mbps
- Kablovski modemi su nešto složeniji od ADSL modema jer postoji problem podele propusnog opsega sa ostalim korisnicima





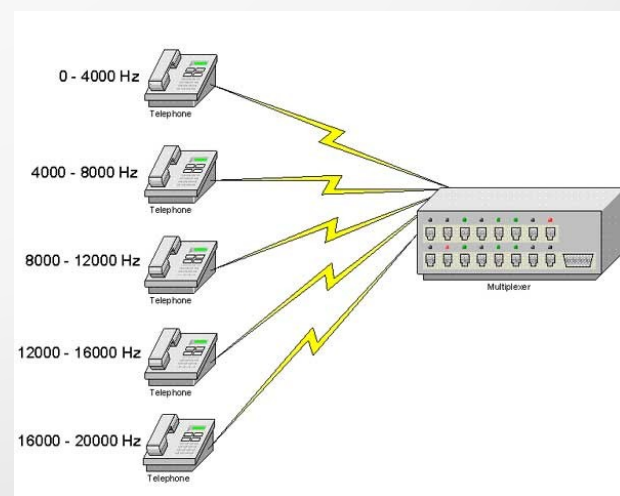
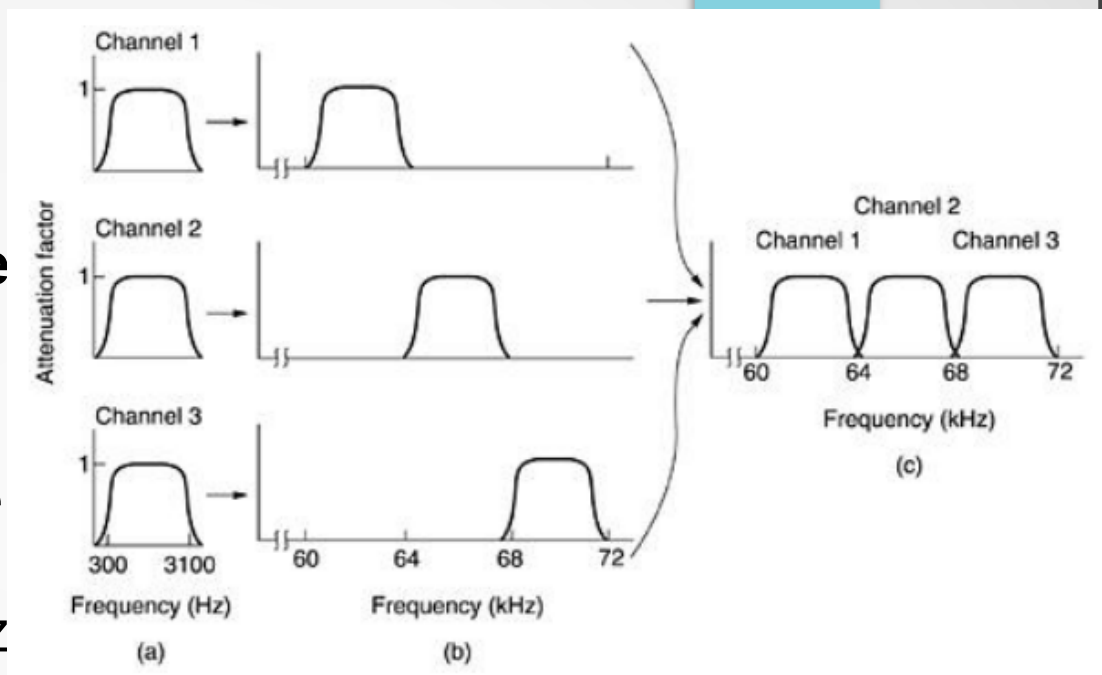
Vodovi i multipleksiranje

Multipleksiranje podelom frekvencije

Multipleksiranje podelom vremena

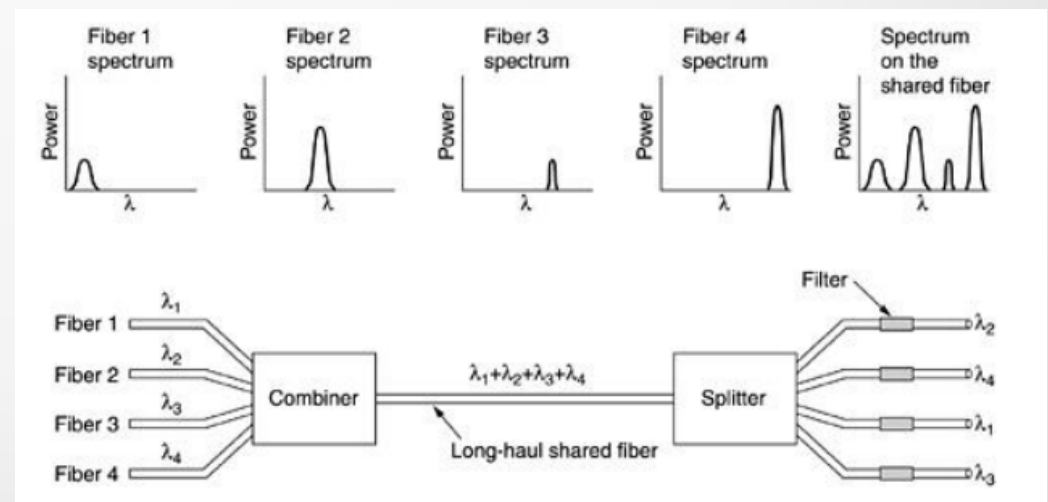
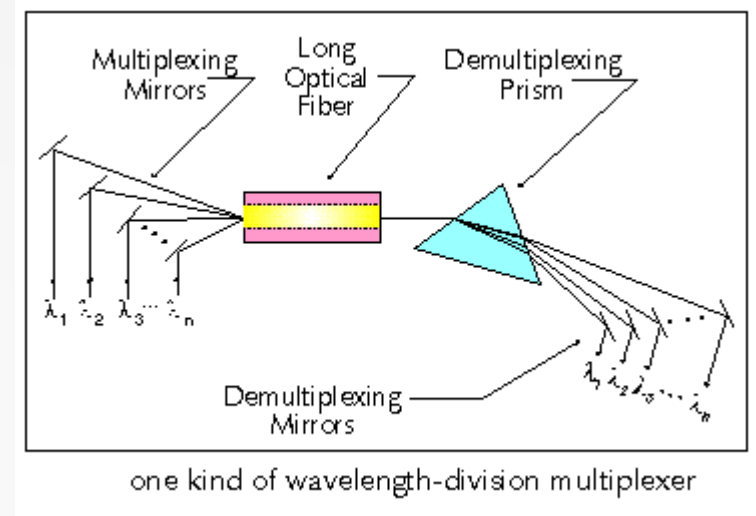
Multipleksiranje podelom frekvencije

- FDM – *Frequency Division Multiplexing*
- Primenjuje se za **prenos više telefonskih razgovora istim vodom**
- Primer: 12 kanala od 4kHz se rasporede u tzv. grupu koja zauzima opseg od 60-108kHz
- Supergrupa, matična grupa...
- Postoji i standard za okupljanje 230.000 govornih kanala!



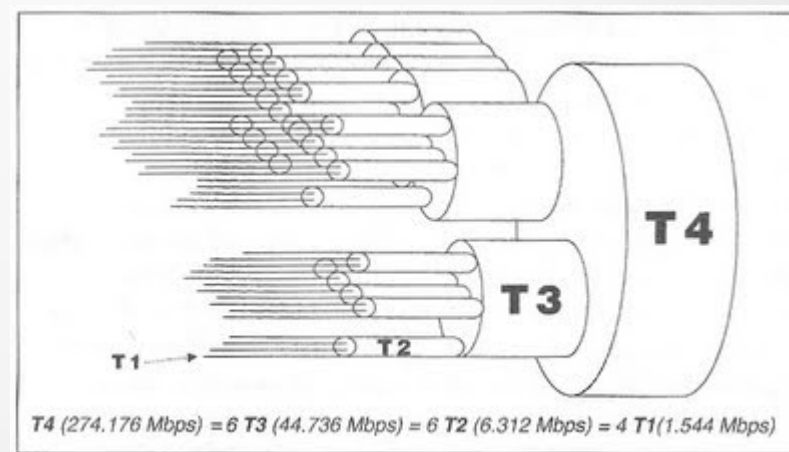
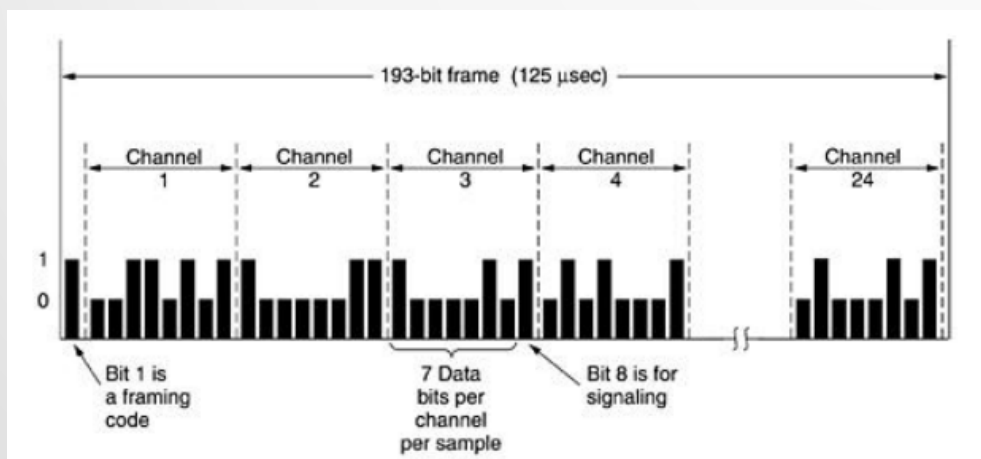
Multipleksiranje podelom talasne dužine

- WDM-*Wavelength Division Multiplexing*
- Varijanta FDM
- Samo za optičke veze
- Uređaj za kombinovanje vlakana i razdvajač
- Primer: opseg od 25THz se deli na 2500 kanala od po 10Gbps (1b/Hz, a može i više)!
- Danas pojačavače treba postavljati tek na svakih 1000km



Multiplexiranje podelom vremena

- **TDM** - *Time Division Multiplexing*
- **PCM** - *Pulse Code Modulation*
- Analogni signal->digitalni 8000 puta u sekundi (svakih 125 μ s). Zašto? 7 bitova po uzorku za podatke+1 kontrolni bit
- Nosilac T1 u SAD i Japanu sadrži 24 multipleksirana govorna kanala
- 28x8=192 bita + 1 marker okvira daje 193 bita svakih 125 μ s. Ukupno 1.544 Mbps.
- Marker okvira sledi šemu 10101...
- 4 T1 nosioca se multipleksiraju u T2, itd.



Hijerarhija T nosilaca

Diferencijalna impulsno-kodna modulacija

- **PITANJE:** Kako smanjiti (komprimovati) zapis digitalizovanog glasa?
- Mala je verovatnoća da za $125\mu\text{s}$ na skali od 128 (7 bitova) signal skoči ± 16 jedinica
- Dakle, umesto 7 može da se pamti **samo 5 bitova diferecijalno** u odnosu na prethodni trenutak
- **Delta modulacija** pamti samo ± 1 , tj. koristi 1 bit po uzorku
- **PROBLEM:** Deo informacija može da se izgubi

