



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission

This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

DBBT

**Digital Broadcasting &
Broadband Technologies**

Telekomunikacioni sistemi

- Nastavnik: Profesor dr Gordana Gardašević

E-mail: gordana.gardasevic@etf.unibl.org

Konsultacije: petak, 13-15h, kabinet: 1309

Literatura

1. G. Gardašević, N. Maletić: ***Uvod u telekomunikacione sisteme i mreže***, Elektrotehnički fakultet, oktobar 2014.
2. M.Jevtović, B.Janačković, G.Gardašević: ***Telekomunikacione mreže i prenosni sistemi - Zbirka zadataka***, 2004.
3. ***Telecommunications Essentials, Second Edition: The Complete Global Source***, Lillian Goleniewski, Kitty Wilson Jarrett, Publisher: Addison Wesley Professional, 2006.
4. ***Essentials of Modern Telecommunications Systems***, Nihal Kularatna, Dileeka Dias, Publisher: Artech House Publishers, 2004-2005.
5. ***Savremene komunikacione tehnologije i mreže***: William A. Shay, izdavač: Kompjuter biblioteka, 2004.

Uvod

- Definicija
- Prenos i mreže
- Prenos signala i mediji
- Modulacija i demodulacija
- Elektromagnetski spektar
- Propusni opseg i kapacitet kanala
- Analiza šuma

Uvod

Definicija telekomunikacija

TELEKOMUNIKACIJE podrazumijevaju emitovanje, prenos ili prijem poruka (govor, zvuk, tekst, slika ili podaci) u vidu signala, korišćenjem žičnih, radio, optičkih ili drugih elektromagnetskih sistema.

ITU - 1989. god.

“**Komunikacije** – svi aspekti razvoja nauke, inženjerstva, tehnologije i aplikacija primjenjeni u prenosu informacija između udaljenih lokacija. Ovo obuhvata sve tipove terminala, računara i procesora informacija; sve sisteme koji omogućavaju prenos informacija; prenosne medijume, komutirane i nekomutirane mreže, mrežne topologije, protokole i arhitekture.”

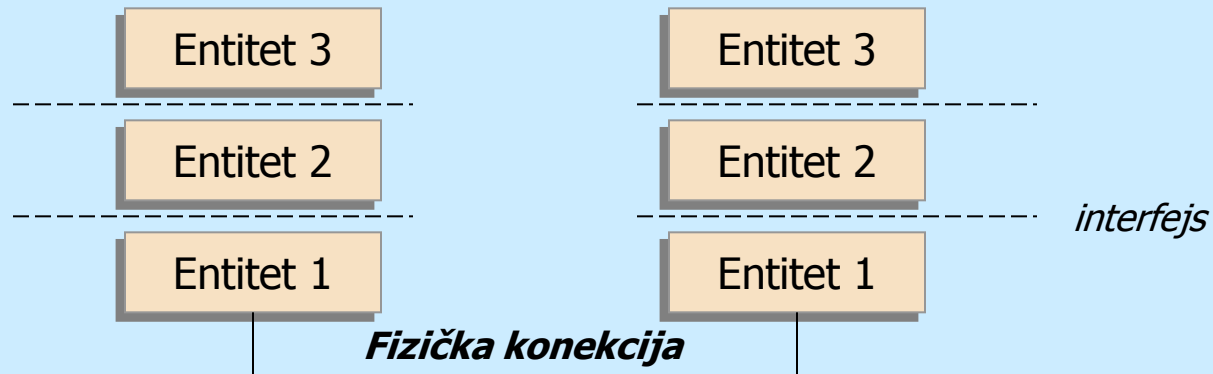
C. R. Baugh

Uvod

- **Telekomunikacije** u širem smislu podrazumijevaju niz tehničkih sredstava potrebnih za prenos informacija između bilo koje dvije tačke, na bilo koje rastojanje, što je moguće pouzdanije i po prihvatljivoj cijeni.
- **Telekomunikaciona sredstva** su oprema i uređaji za obradu, prenos i prijem signala, kao i odgovarajući softver koji imaju primjenu u telekomunikacijama.

- ❑ Korisnik, čija se informacija prenosi telekomunikacionim sistemom, očekuje da će ona biti reprodukovana bez gubitaka i izmjena.
- ❑ Jedan od osnovnih problema u telekomunikacionom sistemu je obezbjeđenje **pouzdanosti** prenosa, tj. **transparentnost** sistema uprkos postojećim nesavršenostima i poremećajima koji se dešavaju u dostupnim telekomunikacionim sredstvima.
- ❑ Korisnik očekuje **permanentan** servis, raspoloživ pod bilo kojim okolnostima. Osiguravanje pouzdanosti, uprkos nepredvidivim i neočekivanim djelimičnim prekidima, od suštinske je važnosti.

Funkcije telekomunikacionih sistema

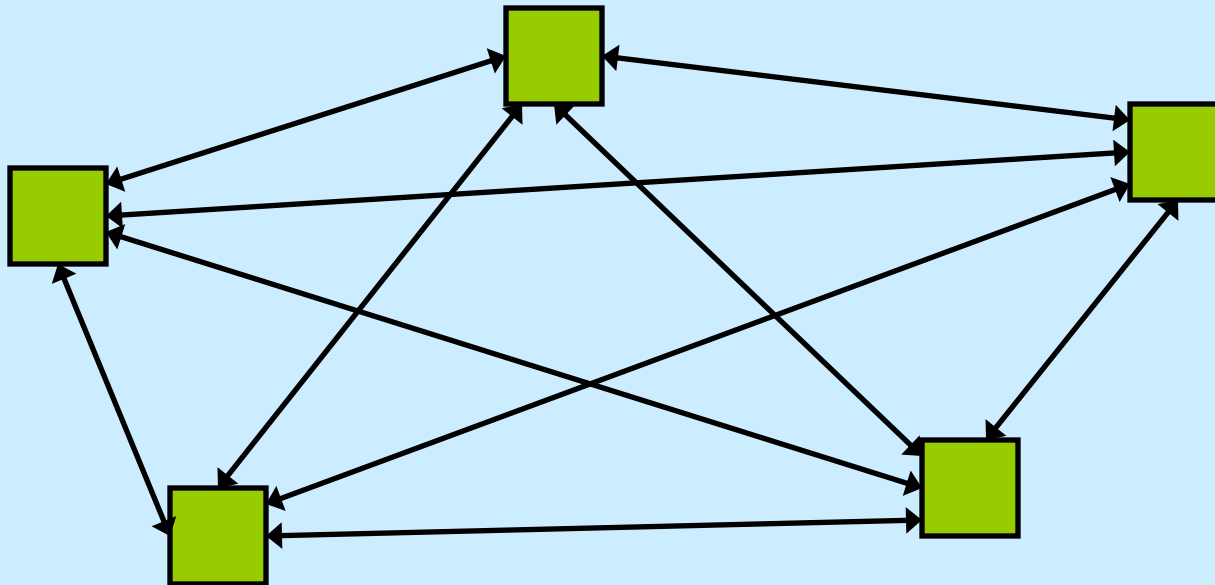


- **Inicijalizacija i raskidanje:** linka/linkova u mreži
- **Sinhronizacija** predajnika i prijemnika: regulisanje paketskog prenosa
- **Protokoli** komunikacije u entitetima: CSMA, CDMA, TCP/IP,...
- **Kontrola grešaka:** korektivne mjere
- **Adresiranje i rutiranje:** usmjeravanje toka prenosa
- **Formatiranje** poruka, izvorno **kodovanje**
- Mreže se realizuju na bazi **slojevite strukture** (npr. OSI - Open Systems Interconnection)

Telekomunikacione mreže

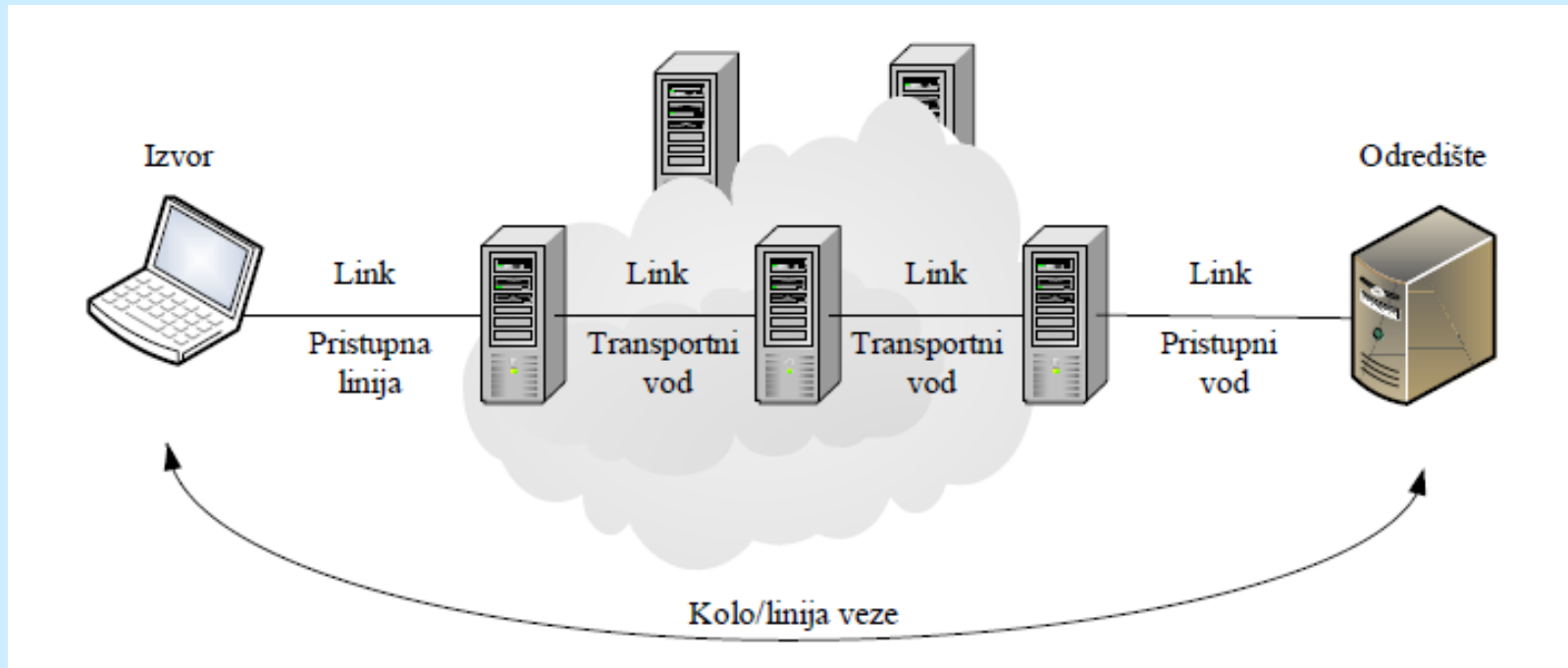


“Tačka-tačka”



“Mesh mreža”

Osnovni pojmovi u TKS



Model linije prenosa

- **Telekomunikaciona mreža** je skup telekomunikacionih sistema i sredstava koji omogućavaju prenos poruka u skladu sa zahtjevima korisnika.
- **Telekomunikaciona usluga** (servis) je usluga koja se u potpunosti ili djelimično sastoji od prenosa i usmjeravanja signala kroz telekomunikacione mreže u skladu sa zahtjevima korisnika i telekomunikacionog procesa.
- **Korisnik** je fizičko ili pravno lice koje koristi telekomunikacione usluge na osnovu zaključenog pretplatničkog ugovora ili na drugi predviđeni način.

Istorija telekomunikacija

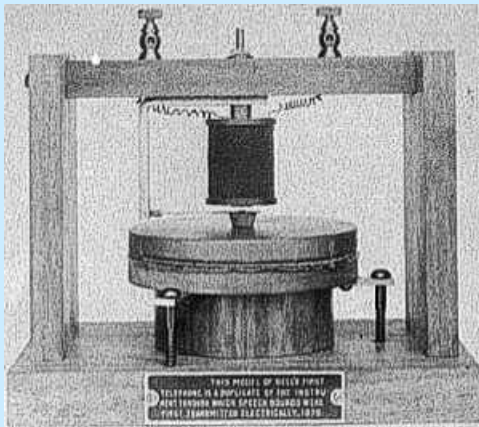
Samuel Morse: 1837.g. telegraf



Istorija telekomunikacija

Samuel Morse: 1837.g. telegraf

Alexander Bell: 1876.g. telefon

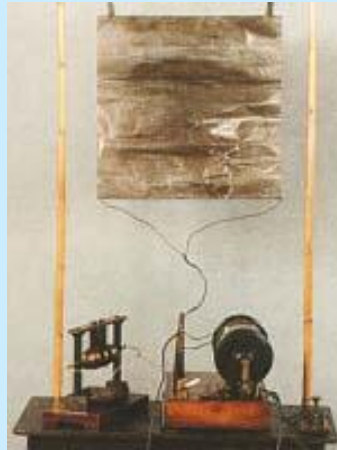


Istorija telekomunikacija

Samuel Morse: 1837.g. telegraf

Alexander Bell: 1876.g. telefon

Marconi: 1895.g. patentirao bežični telegrafski sistem



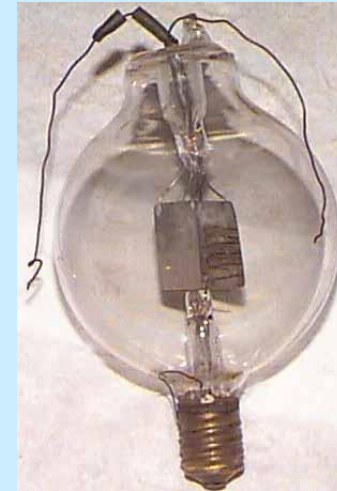
Nikola Tesla <1895.g. : pronalazač radio-prenosa



Istorija telekomunikacija

Samuel Morse:	1837.g.	telegraf
Alexander Bell:	1876.g.	telefon
Marconi:	1895.g.	patentirao bežični telegrafski sistem
Nikola Tesla	<1895.g.	pronalazač radio-prenosa

Lee De Forest 1907.g.: triodna vakuumaska cijev 'Audion'



Istorija telekomunikacija

Samuel Morse: 1837.g. telegraf

Alexander Bell: 1876.g. telefon

Marconi: 1895.g. patentirao bežični telegrafski sistem

Nikola Tesla <1895.g. pronalazač radio-prenosa

Lee De Forest 1907.g. triodna vakuumaska cijev 'Audion'

1920.g.

Komercijalni AM radio-prenos

Istorija telekomunikacija

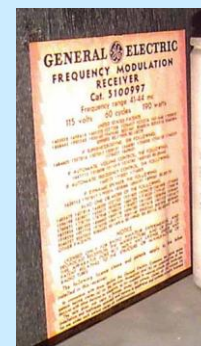
Samuel Morse:	1837.g.	telegraf
Alexander Bell:	1876.g.	telefon
Marconi:	1895.g.	patentirao bežični telegrafski sistem
Nikola Tesla	<1895.g.	pronalazač radio-prenosa
Lee De Forest	1907.g.	triodna vakuumaska cijev 'Audion'
	1920.g.	komercijalni AM radio-prenos



1927.g. : prvi HF transatlanski telefonski link (London-NY)
prvi prenos pokretne slike – TV prenos NY-Vašington

1937.g. radar

1939.g. prvi FM radio-prenos 'Alphine New Jersey'
Edwin Armstrong



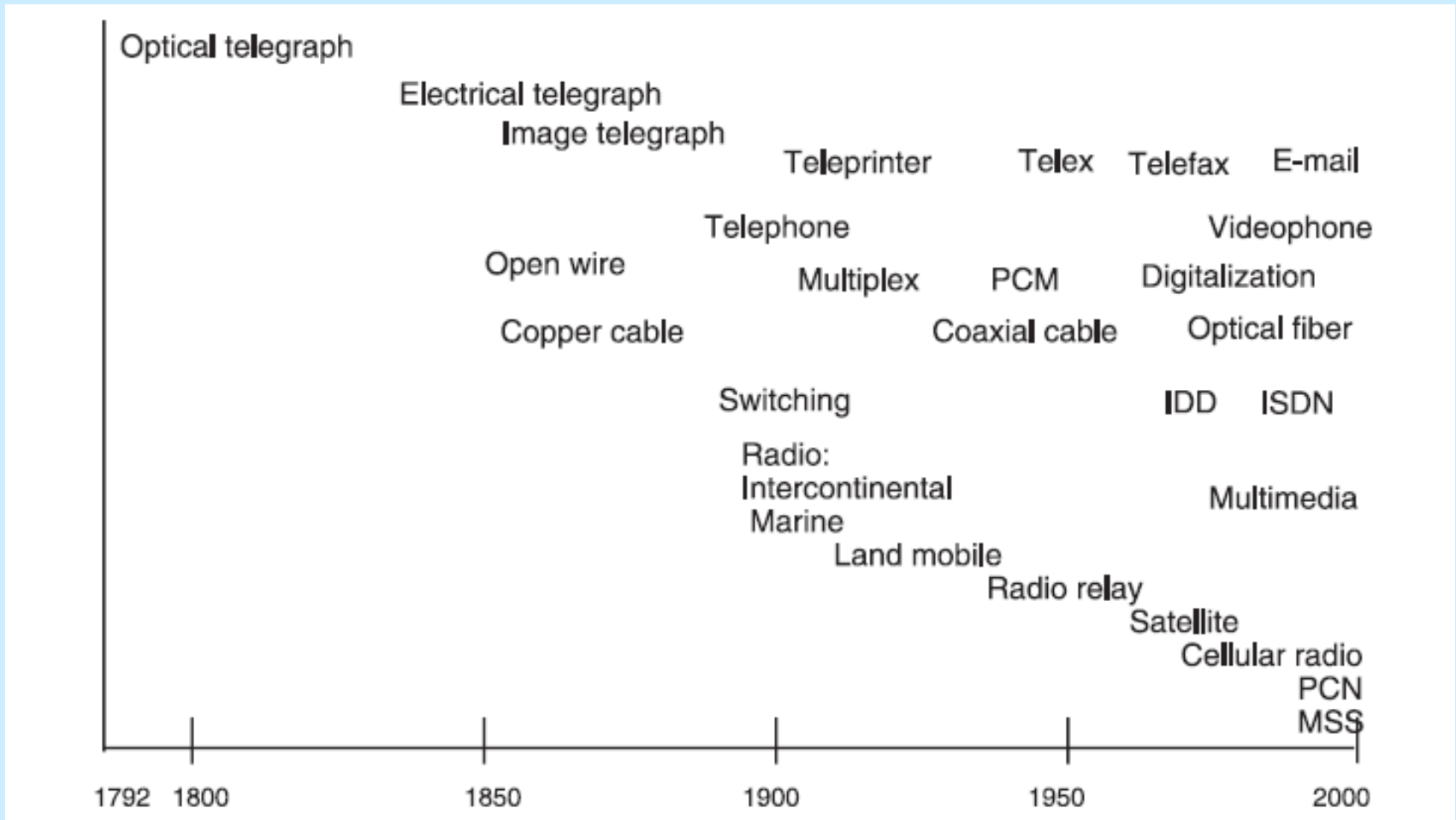
Istorija telekomunikacija

- **1938.g.** Alec Reeves – PCM – digitalna reprezentacija analognih signala
- **1948.g.** Schottky sa saradnicima – tranzistor
- **1956.g.** prvi podmorski transatlantski telefonski kabl
- **1960.g.** pronalazak lasera
- **1962.g.** satelit TELSTAR (LEO) omogućio je prvi interkontinentalni TV prenos
- **1965.g.** Early Bird (Intelsat I) prvi geostacionarni satelit
- **1969.g.** direktan prenos čovjekovog iskrcavanja na Mjesec
- **1970.g.** optička vlakna prihvatljivog slabljenja; AMPS – ćelijski sistem mobilne telefonije
- **1990.g.** globalni Internet

Istorija telekomunikacija

- **1992.g.** pušten u rad digitalni mobilni sistem GSM
- **1994.g.** GPS – globalni sistem za pozicioniranje pušten u civilnu upotrebu; prvi WDM (Wavelength Division Multiplexing) optički sistemi
- **1998.g.** pušten u rad telekomunikacioni sistem LEO satelita - IRIDIUM
- **2001.g.** 3G sistemi mobilne telefonije
- **2005.g.** WiFi, WiMAX, širokopojasni servisi do kuće, FTTH
- **2009.g.** 4G mobilni sistemi
- **2012.g.** Definisiranje 5G zahtjeva
- **2012.g.** Definisiranje Internet of Things (IoT) koncepta

Istorijat razvoja telekomunikacionih sistema



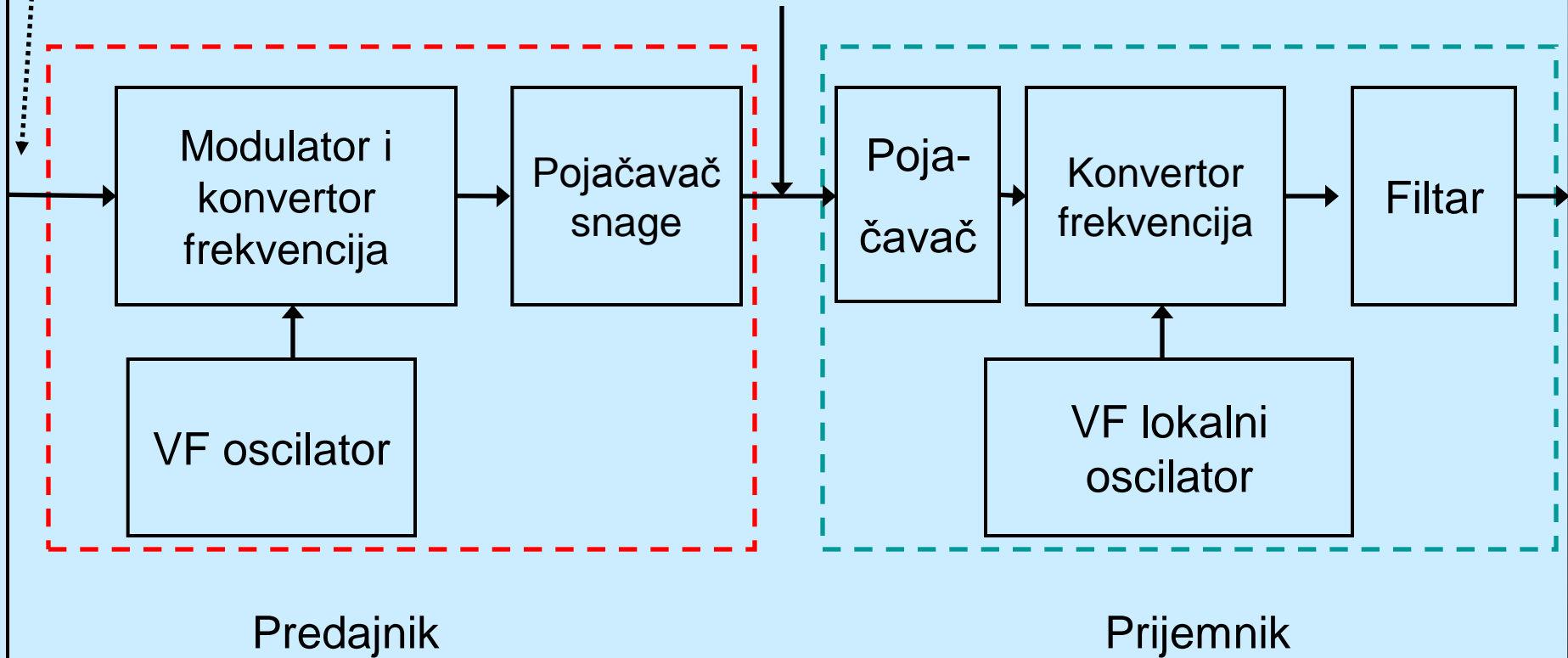
Model telekomunikacionog sistema



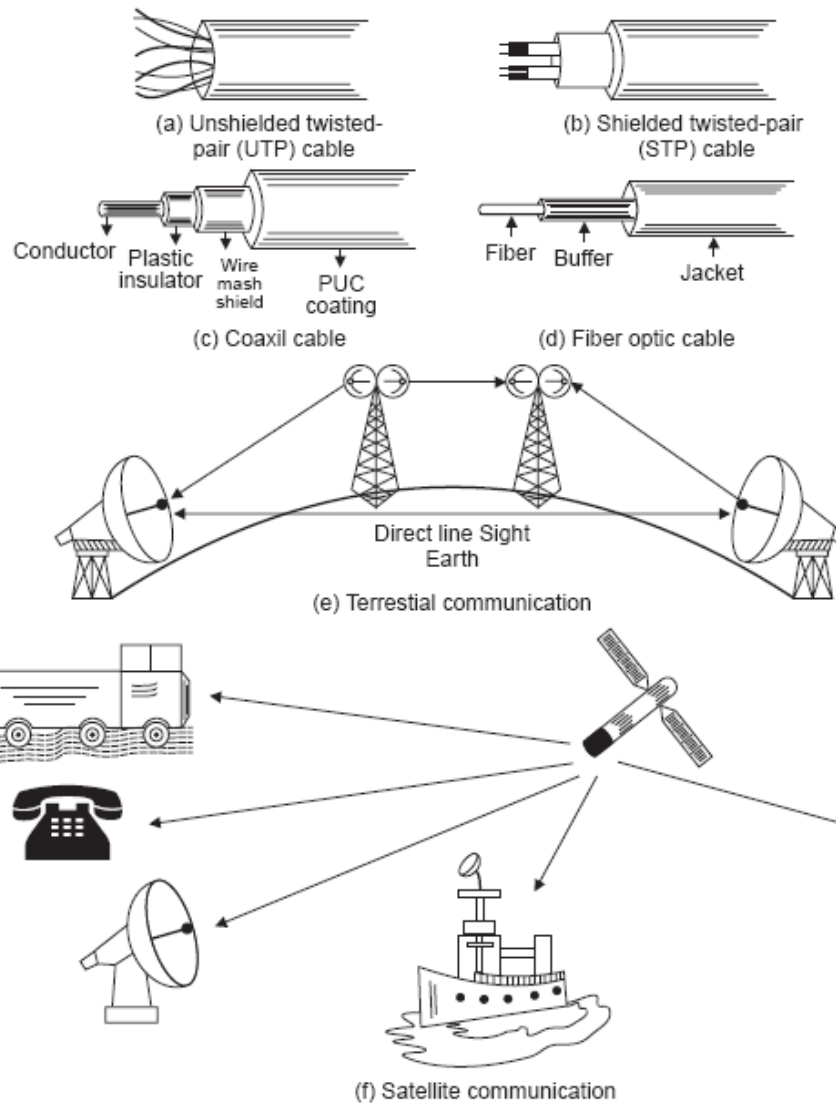
Model telekomunikacionog sistema

NF izvor informacije
(analogni ili digitalni)

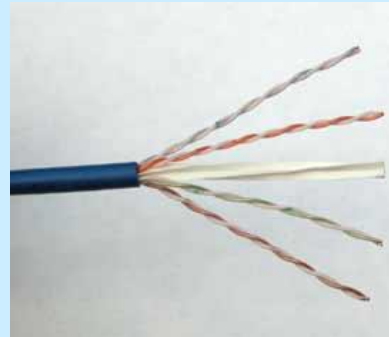
Prenosni
medijum (kanal)



Prenosni medijumi



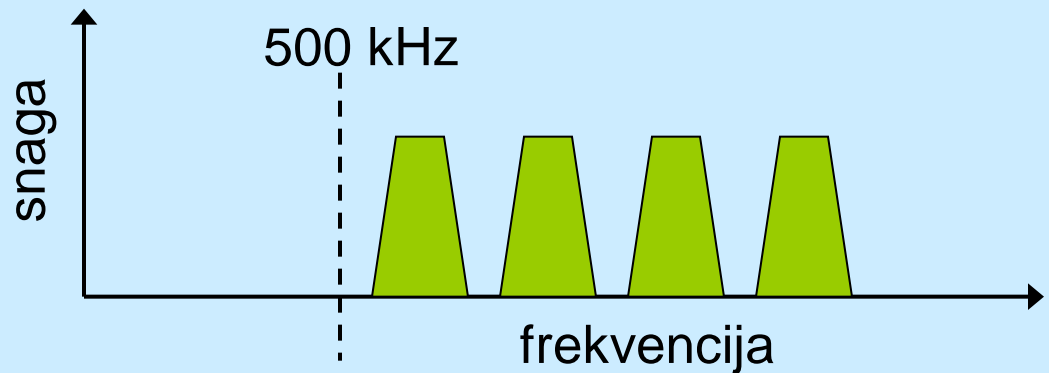
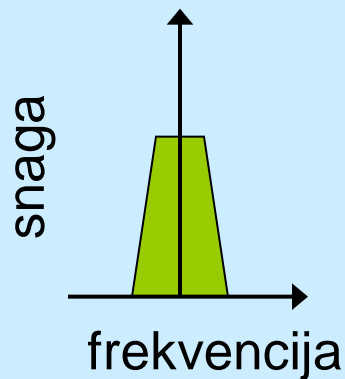
Prenosni medijumi i proizvodi



Prilagođenje medijumu prenosa

Potreba: frekvencijski opseg prenosa
Efikasnost: multipleksiranje
Kvalitet: npr. zbog pojave šuma, interferencije

Primjer: Mikrotalasni AM radio-prenos



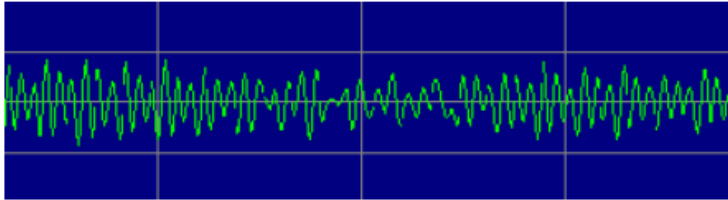
Modulacija

Signali

- ❖ Signali su fizička reprezentacija podataka
 - Funkcija vremena i prostora
 - Parametri signala predstavljaju vrijednosti podataka
- ❖ Klasifikacija signala
 - Kontinualno vrijeme ili diskretno vrijeme
 - Kontinualne vrijednosti ili diskretne vrijednosti
 - Analogni signali – kontinualno vrijeme i vrijednosti
 - Digitalni signal – diskretno vrijeme i vrijednosti
- ❖ Parametri periodičnih signala:
 - Period T , frekvencija $f = 1/T$, amplituda A , fazni pomjeraj φ
 - Sinusni signal kao specijalni signal: nosilac $s(t) = A \cos(2\pi ft + \varphi)$

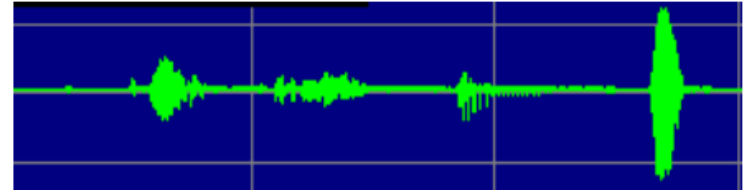
Signali

■ Skup govornih tonova:



- superpozicija nekoliko tonova
- tonovi se ne mogu razdvojiti prikazom u vremenskom domenu
- frekvencijske komponente se mogu razdvojiti prikazom u frekvencijskom domenu

■ Uzorak govornog signala:



- naletni saobraćaj
- varijacija amplituda
- varijacija frekvencije (faze)
- primjeri naletnog saobraćaja:
 - video prenos
 - Ethernet paketi

- ❖ Često se analogni izvori digitalizuju zbog sljedećih prednosti:
 - korekcija i detekcija grešaka
 - jednostavno multipleksiranje
 - jednostavno prilagođenje uslovima prenosa.

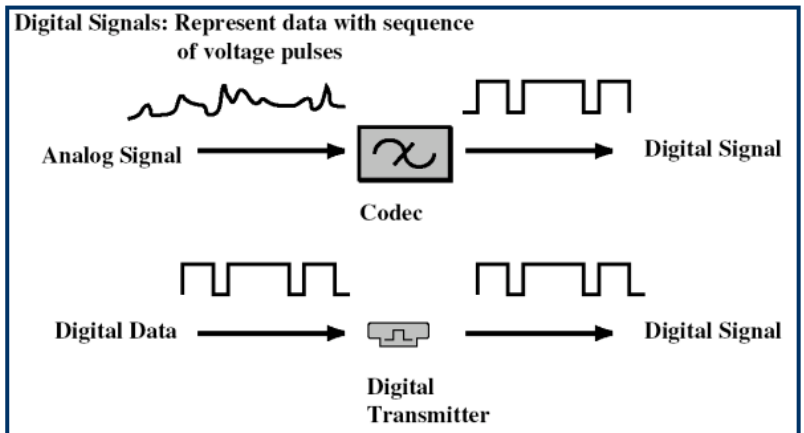
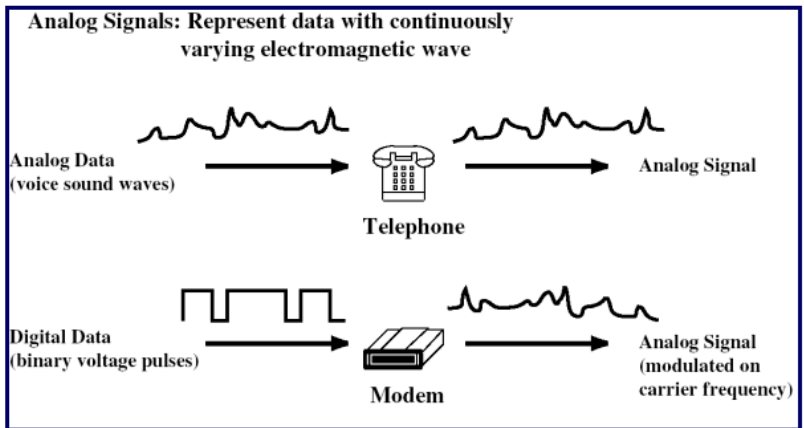
Klasifikacija signala

- Deterministički signali
- Slučajni i pseudoslučajni signali
- Energetski signali: impulsi
- Kontinualni signali; diskretni signali

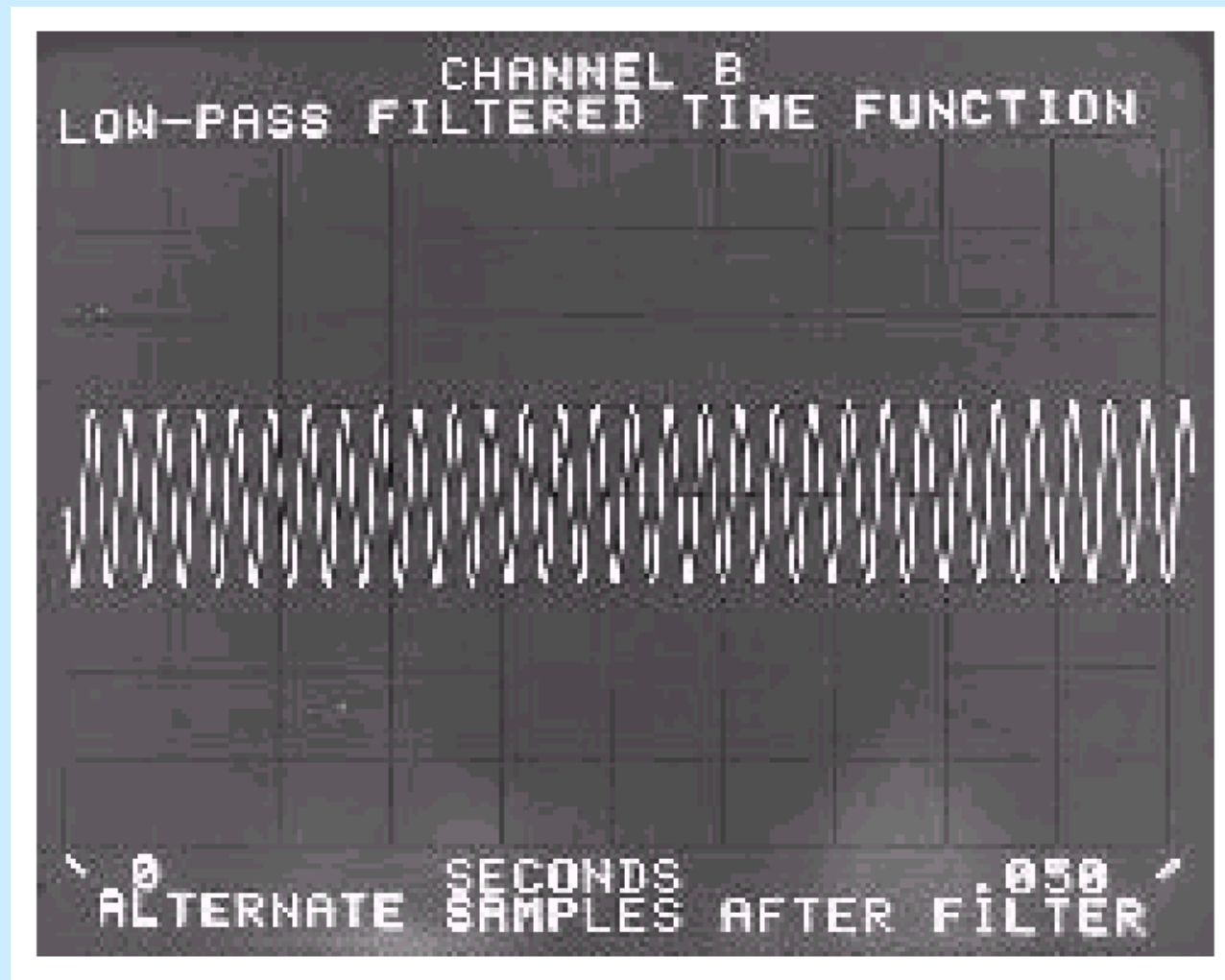
$$x(t), x[n] = x(nT_s), X(f), X[k]$$

- Analogni i digitalni signali
- Realni i kompleksni signali
- Promjenjivi i konstantni signali

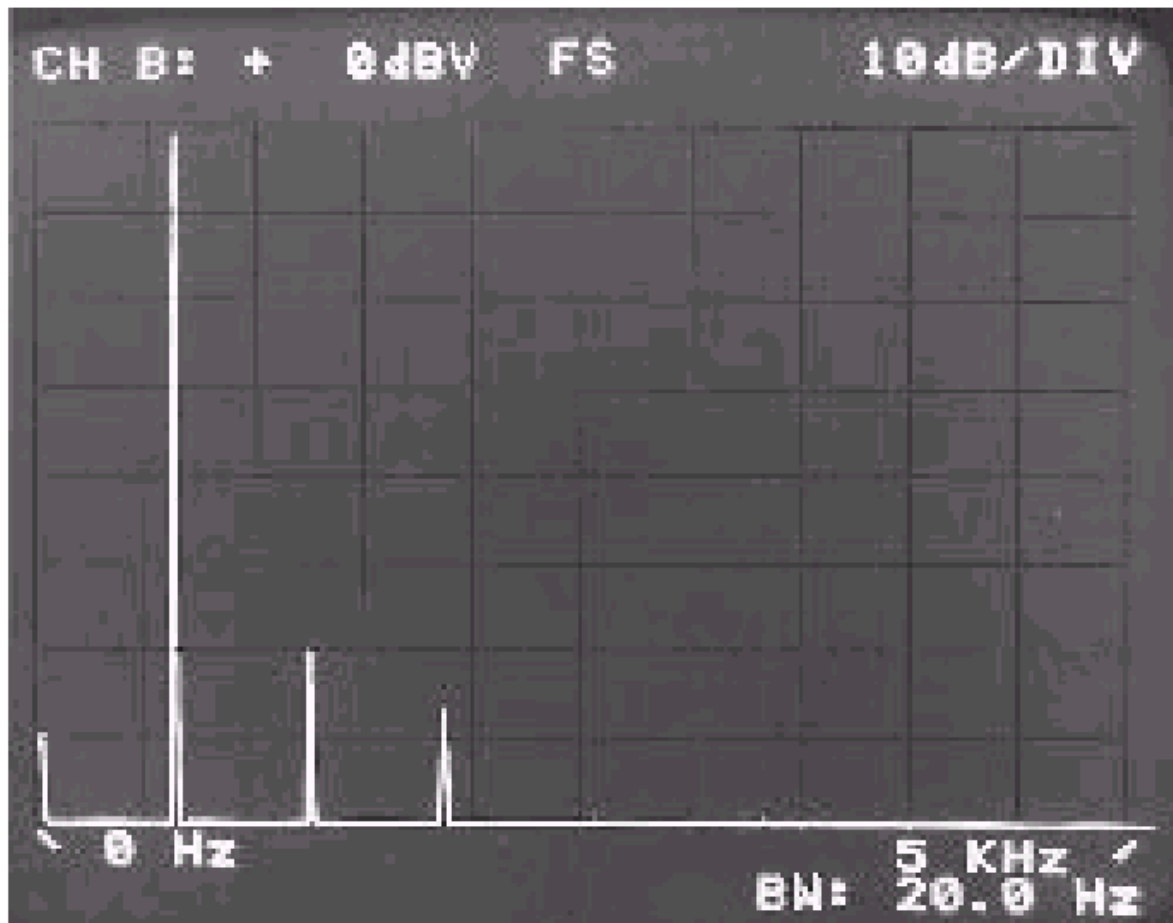
Analogni i digitalni signali



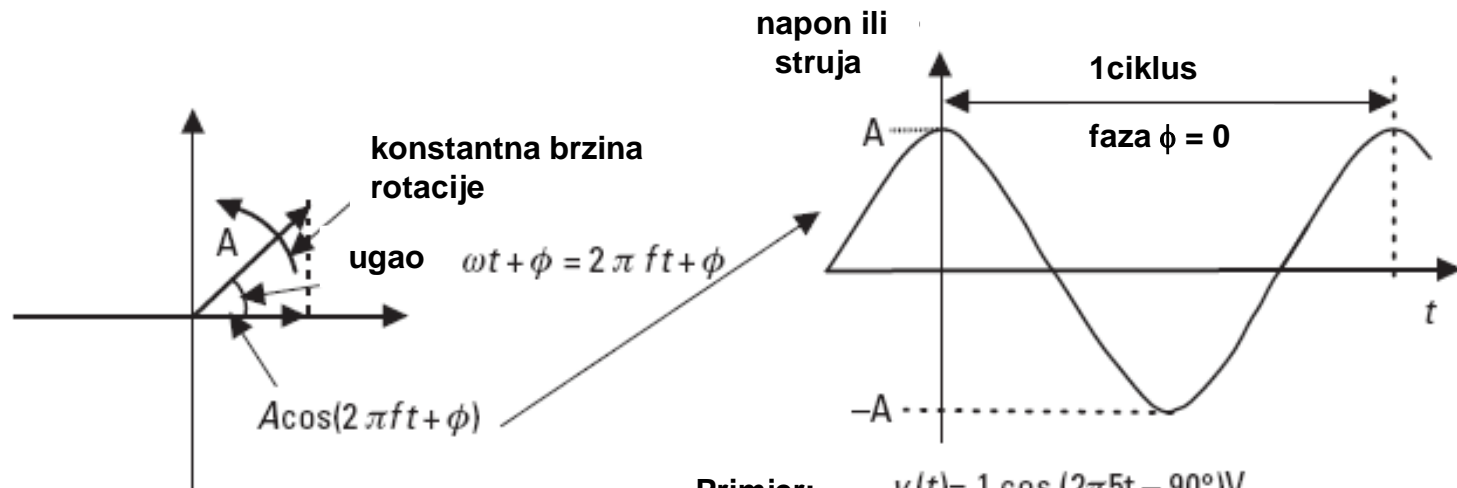
Predstavljanje signala u vremenskom domenu



Predstavljanje signala u frekvencijskom domenu daje više podataka o signalu

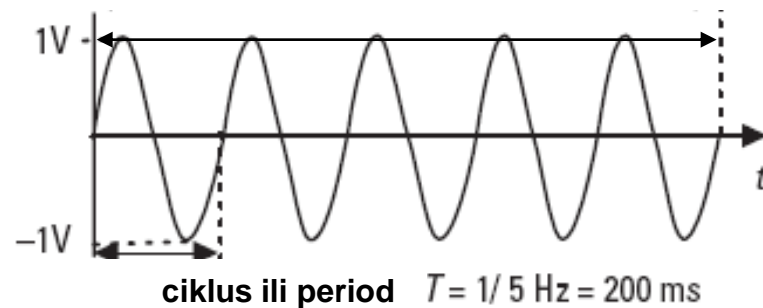


Signali - frekvencija



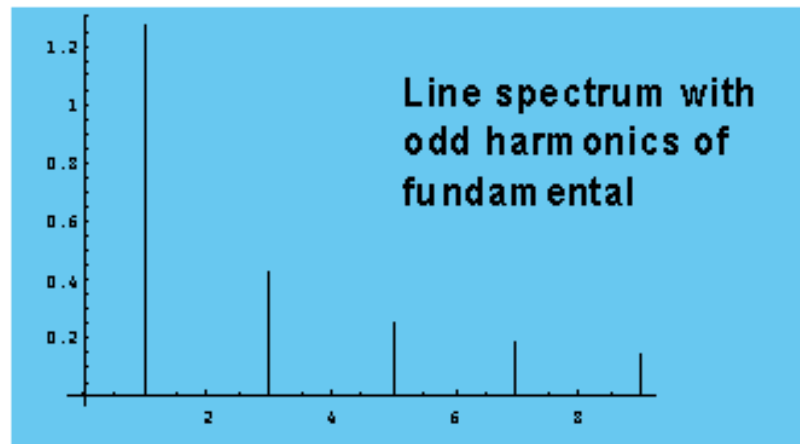
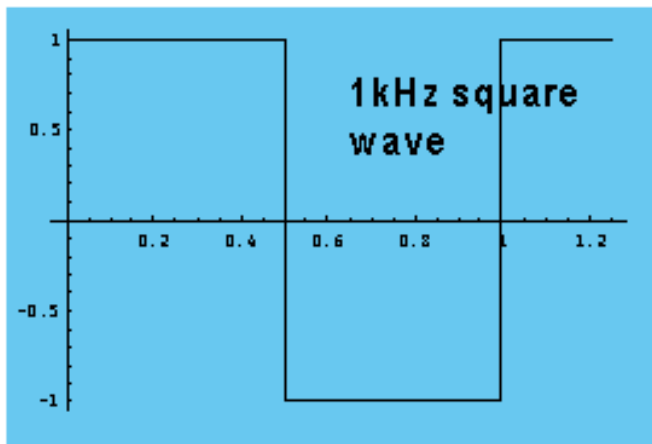
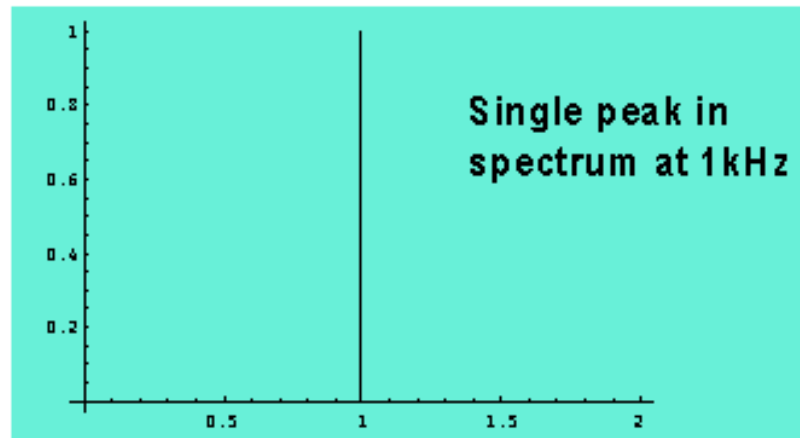
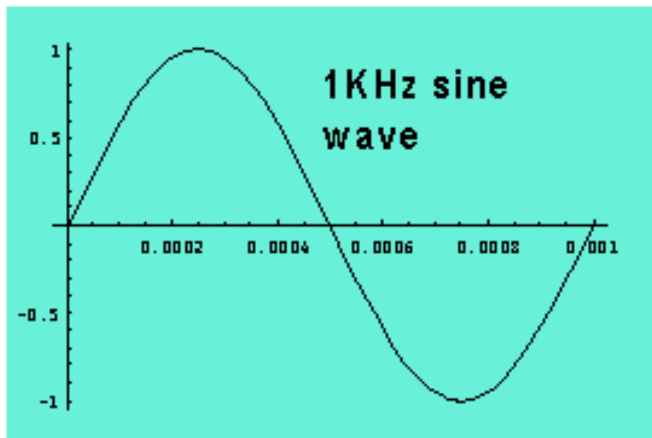
Primjer: $v(t) = 1 \cos(2\pi 5t - 90^\circ) \text{V}$

1 sekunda, 5 ciklusa /s = 5 Hz

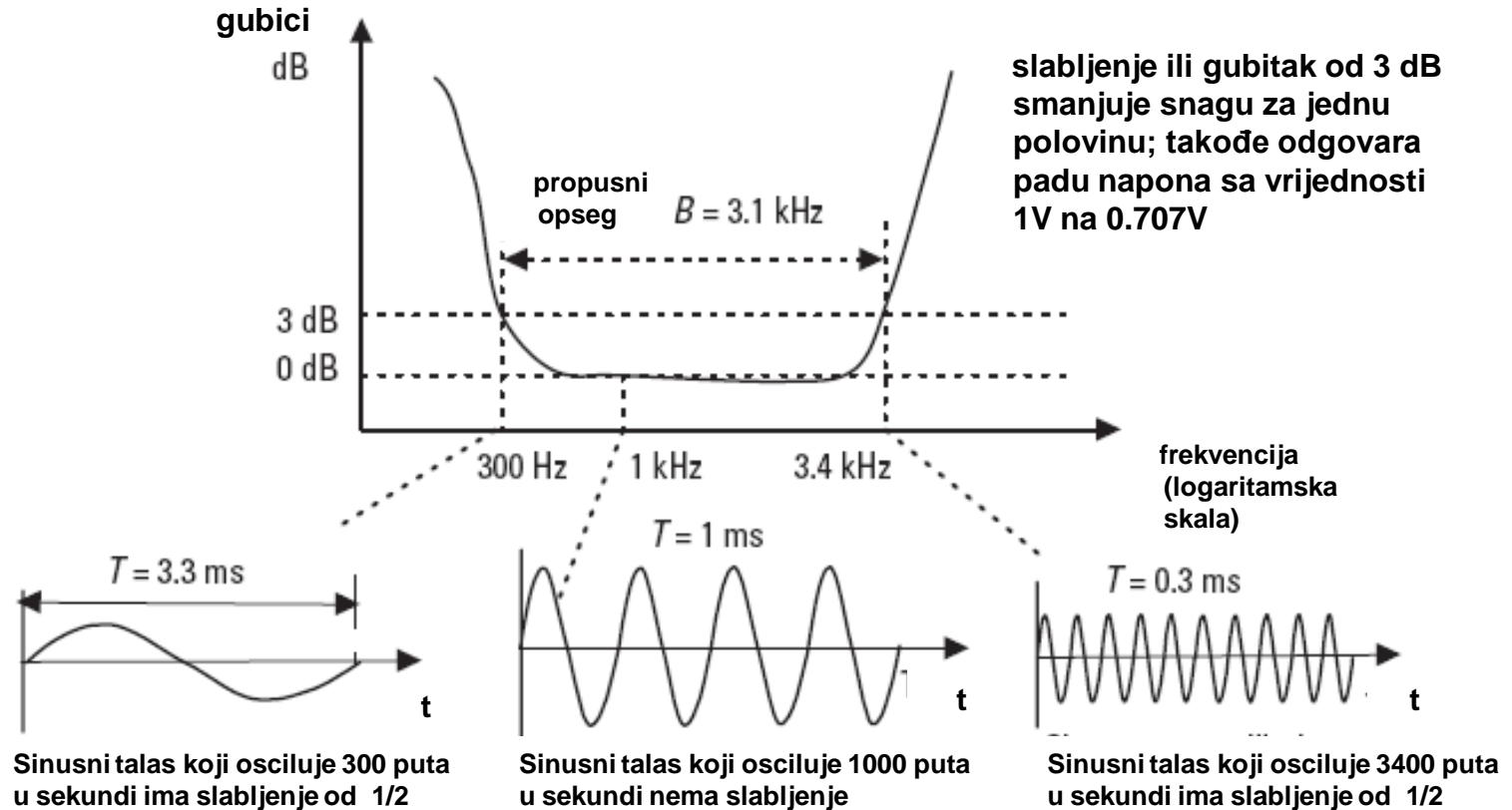


Primjeri spektara signala

- n Svi konačni signali imaju spektar koji se može odrediti Fourier-ovim transformacijama (impulsi) ili Fourier-im serijama (periodični signali).

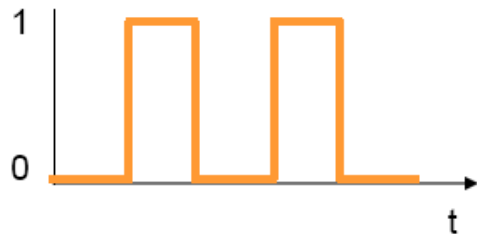


Signali – propusni opseg

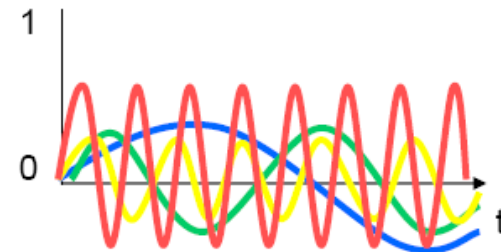


Fourier-ova reprezentacija periodičnih signala

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



idealni periodični
signal



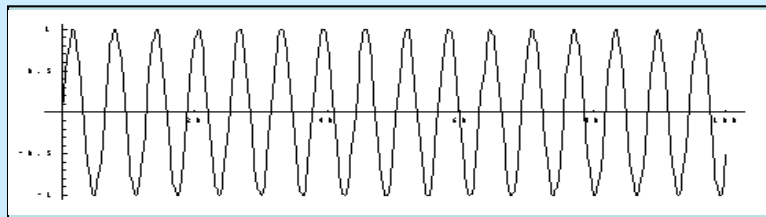
realna kompozicija
(bazirana na harmonicima)

Modulacija

- **Modulacija** obezbeđuje adekvatno korišćenje medijuma prenosa. Izbor **modulacione metode** zasnovan je na:
 - poruci koju treba prenijeti (izvor):
 - govor/video (analogni izvor)
 - podaci (digitalni izvor)
 - statistika o saobraćaju: kontinualan/naletni saobraćaj
 - dozvoljenom kašnjenjenju
 - vrsti medijuma za prenos
 - vrsti mreže
 - celularne bežične mreže (GSM, UMTS, LTE, 4G, 5G)
 - RF-LAN (802.11b Wi-Fi, HiperLAN/2)
 - lokalne računarske mreže (Ethernet LAN-ovi)
 - javna telefonska mreža (PSTN)

Modulisani i nemodulisani sinusoidalni talasi

- Nemodulisani sinusni talas opisuje se konstantnom amplitudom, frekvencijom i fazom.



nemodulisana sinusoida

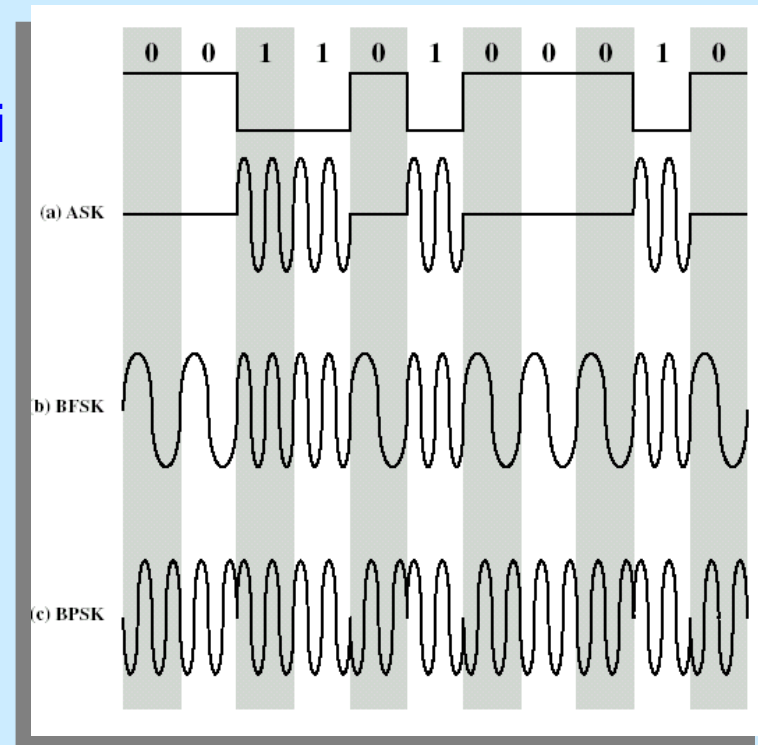
- Promjena parametra nosioca:

$$x(t) = A(t) \cos[\omega_c t + \phi(t)]$$

Amplitude modulation (AM)..., Amplitude Shift Keying (ASK)...

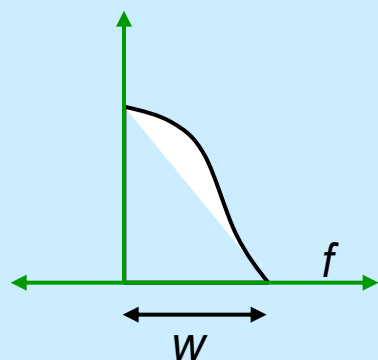
Član nosioca

Frequency modulation (FM), Frequency/Phase Shift Keying (FSK, PSK)...



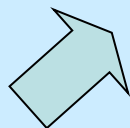
Primjeri digitalnih nosilaca

Modulisani i nemodulisani sinusoidalni talasi

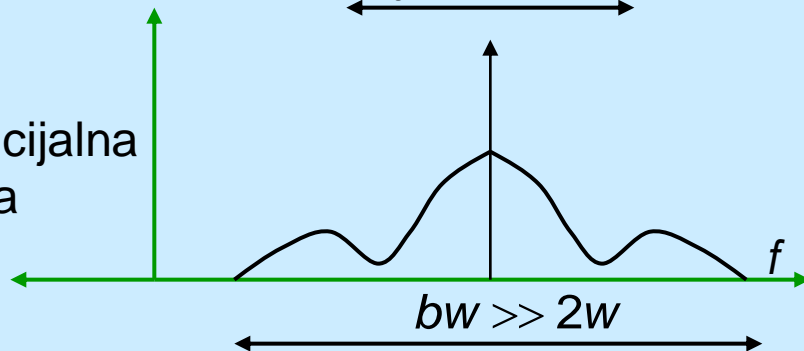
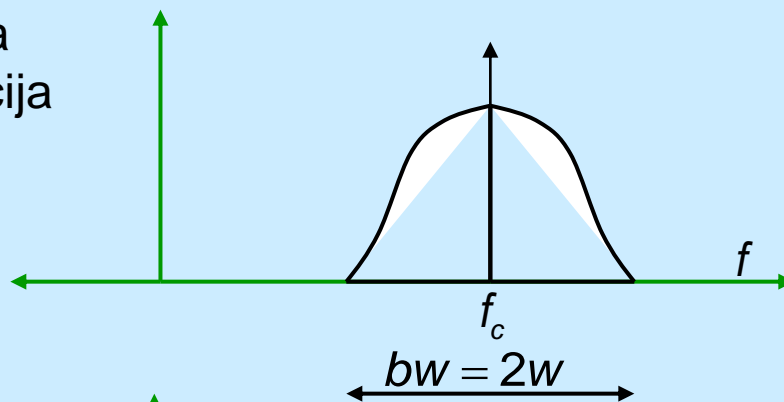


Spektar u osnovnom opsegu

Linearna modulacija (AM...)



Eksponencijalna modulacija (FM...)



- Slike prikazuju prenos poruke u osnovnom opsegu primjenom linearne (AM) i eksponencijalne (FM) modulacije.
- Kod linearne modulacije širina propusnog opsega prenosa je uvijek manja ili jednaka $2W$ (W : propusni opseg poruke (signala)).
- Nelinearna (ugaona) modulacija širi signal na opseg znatno veći od $2W$.

Principi modulacije

Promjena parametra nosioca:

$$v_{\text{mod}}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_c)$$

Informacioni signal: $A_c(t)$

$f_c(t)$

$\theta(t)$

$A_c(t)$: amplitudska modul.

$f_c(t)$: frekvencijska modul.

$\theta(t)$: fazna modul.

Analogni

Digitalni

AM

ASK

FM

FSK

PM

PSK

$A_c(t)$ i $\theta(t)$ \Rightarrow QAM (digitalna) modulacija

Principi demodulacije

Obnavljanje informacionog signala iz prijemnog modulisanog signala.

Primjer:

AM: prenešeni signal $v_{am}(t) = v_m(t) \cos(2\pi f_c t)$

Demodulacija: množenje sa $\cos(2\pi f_c t)$ u prijemniku

$$v_{dem}(t) = v_m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t)$$

$$= v_m(t) \cos^2(2\pi f_c t)$$

$$= \frac{1}{2} v_m(t) [1 + \cos(2\pi 2f_c t)]$$

$$= \frac{1}{2} v_m(t) + \frac{1}{2} v_m(t) \cos(2\pi 2f_c t)$$

← NF filtriranje

Elektromagnetni frekvencijski spektar

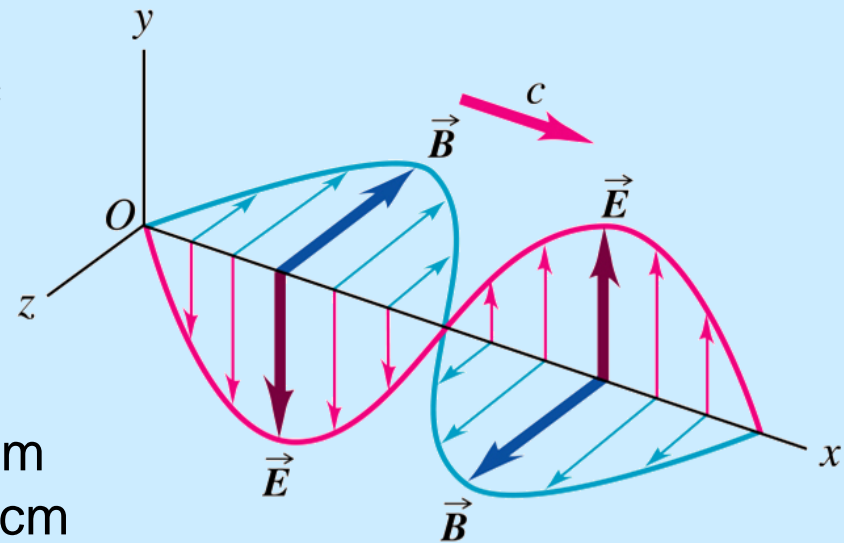
Frekvencija : f [Hz]
Talasna dužina: λ [m]

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

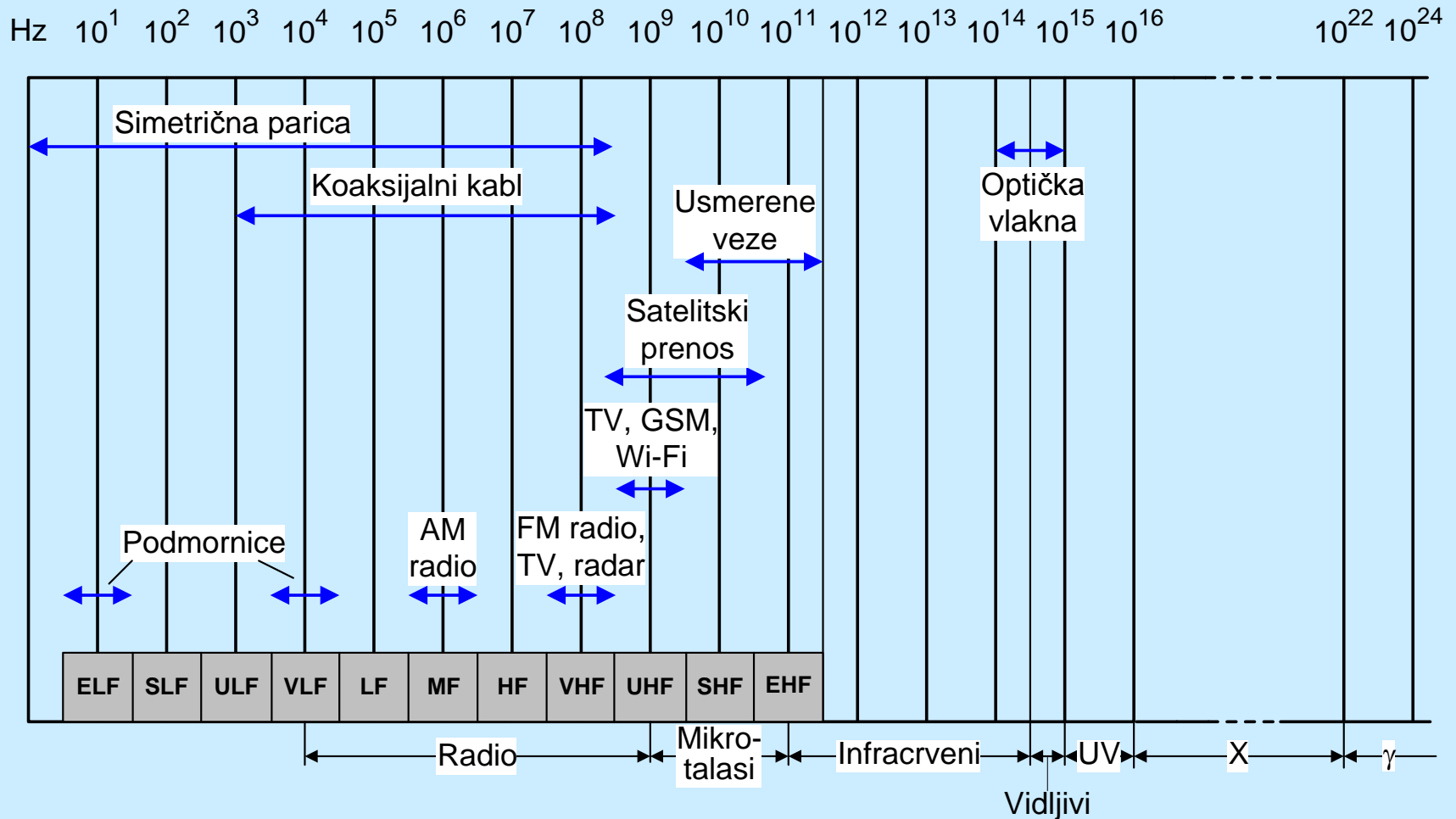


c - brzina prostiranja svjetlosti = $3 \cdot 10^8$ m/sec

f		λ
1 kHz	→	$3 \cdot 10^5$ m
100 kHz	→	$3 \cdot 10^3$ m
10 MHz	→	$3 \cdot 10^1$ m = 30 m
1 GHz	→	$3 \cdot 10^{-1}$ m = 30 cm



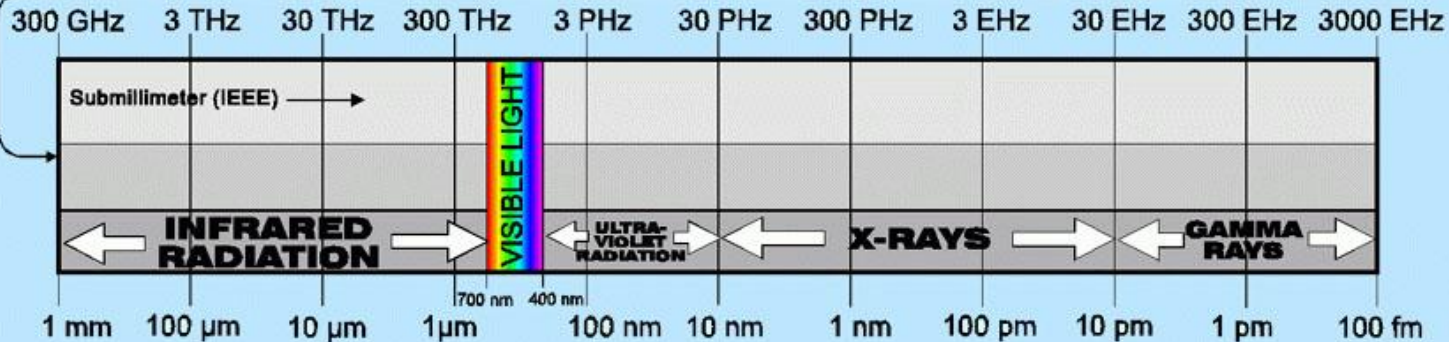
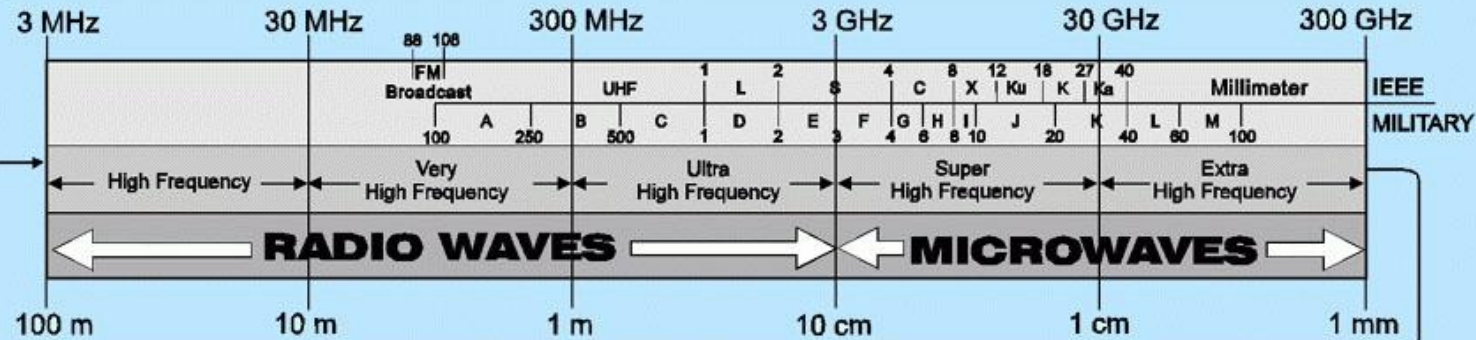
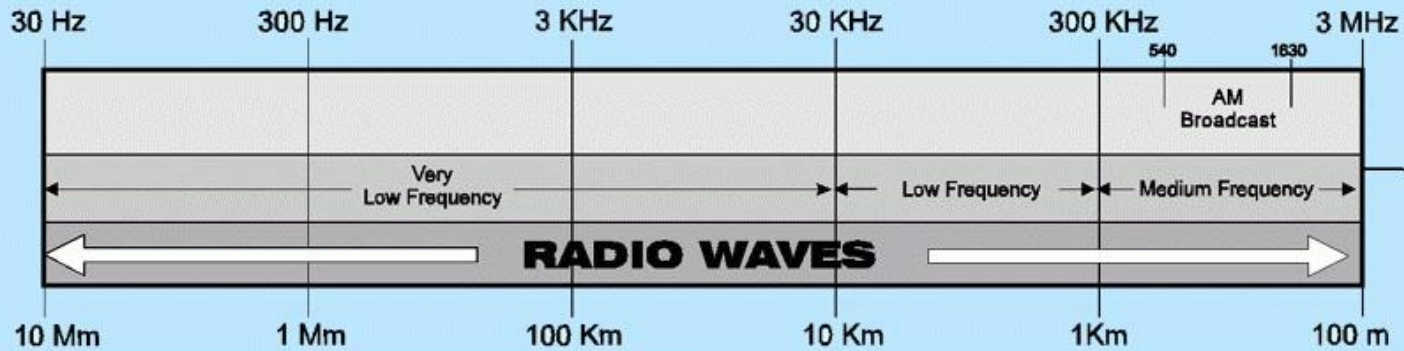
Elektromagnetski spektar i primjena u telekomunikacijama



Elektromagnetski spektar i primjena u telekomunikacijama

- ELF – Extremely Low Frequency, 3Hz– 30Hz
- SLF – Super Low Frequency, 30Hz– 300Hz
- ULF – Ultra Low Frequency, 300Hz– 3kHz
- VLF – Very Low Frequency, 3kHz– 30kHz
- LF – Low Frequency, 30kHz– 300kHz
- MF – Medium Frequency, 300kHz– 3MHz
- HF – High Frequency, 3MHz– 30MHz
- VHF – Very High Frequency, 30MHz– 300MHz
- UHF – Ultra High Frequency, 300MHz– 3GHz
- SHF – Super High Frequency, 3GHz– 30GHz
- EHF – Extremely High Frequency, 30GHz– 300GHz

RADIO FREQUENCY SPECTRUM



Propusni opseg i informacioni kapacitet (1)

Hartley-ev zakon: 1920. god.

$$I \propto B \times t$$

I = količina informacije

B = propusni opseg sistema (Hertz)

t = vrijeme prenosa (sekunde)

Informacija

Mjera informacije je njena vjerovatnoća: Ako događaj x_i ima vjerovatnoću

$P(x_i) = P_i$, onda je količina informacije:

$$I_i = -\log_b P_i = \log_b \frac{1}{P_i}$$

Važe relacije:

$$I_i \geq 0, 0 \leq P_i \leq 1$$

$$P_i \rightarrow 0, I_i \rightarrow \infty$$

$$I_{ij} = I_i + I_j$$

Za binarne, jednako vjerovatne simbole, vrijedi:

$$P(x_1) = P(x_2) = 1/2, I_1 = I_2 = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

Prenos informacija telekomunikacionim sistemima

- ❖ Telekomunikacioni sistemi varijacijom struja i napona (tj. varijacijom elektro-magnetnog polja EMP) memorišu i prenose informacije.
- ❖ Telekomunikacioni sistemi se projektuju za prenos informacija "od tačke do tačke" (unicast) ili "od tačke do više tačaka" (multicast) primjenom linkova i mreža.
- ❖ Telekomunikacione poruke se prenose različitim medijima prenosa, kao npr:
 - bakarne žice (bakarne parice, koaksijalni kablovi,....)
 - talasovodi
 - optička vlakna
- ❖ Signal se prilagođava prenosu i prenosnom mediju primjenom postupaka modulacije i kodovanja.

Propusni opseg i informacioni kapacitet (2)

Shannon-ova formula za granicu informacionog kapaciteta:

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3.32B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

I = informacioni kapacitet (bita u sekundi)

B = propusni opseg sistema (Hertz)

S/N = odnos snaga signala/snaga šuma

Propusni opseg i informacioni kapacitet

Primjer:

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3.32B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Standardna telefonija:

$$\frac{S}{N} = 1000 \quad (30 \text{ dB})$$

$$B = 2,7 \text{ kHz}$$

$$I = ?$$

Propusni opseg i informacioni kapacitet

Primjer:

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3.32 B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Standardna telefonija:

$$\frac{S}{N} = 1000 \quad (30 \text{ dB})$$

$$B = 2,7 \text{ kHz}$$

$$I = 2700 \log_2 (1 + 1000) = 26.9 \text{ kbit/sec}$$

Propusni opseg i brzina prenosa

Vrsta aplikacije	Propusni opseg	Bitska brzina
Govorni signal	300 -3400 Hz	
Muzika	50 Hz -16 kHz	
Faksimil	40 kHz	
Televizija	0 – 55 MHz	
Personalna komunikacija		300 – 9600 bita/s
E-mail		2400 – 9600 bita/s
Digitalni audio		1 – 2 Mbita/s
Komprimovani video		2 – 10 Mbita/s
Pokretni video		1 – 2 Gbita/s

Šum

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3.32B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

S/N = odnos snaga signala/snaga šuma

Za dati propusni opseg, sistem ima veći kapacitet ako je odnos S/N veći.

Problem: u praktičnim sistemima šum je uvijek prisutan.

- Šum - interni (generisan unutar uređaja)
- vanjski (generisan van uređaja)

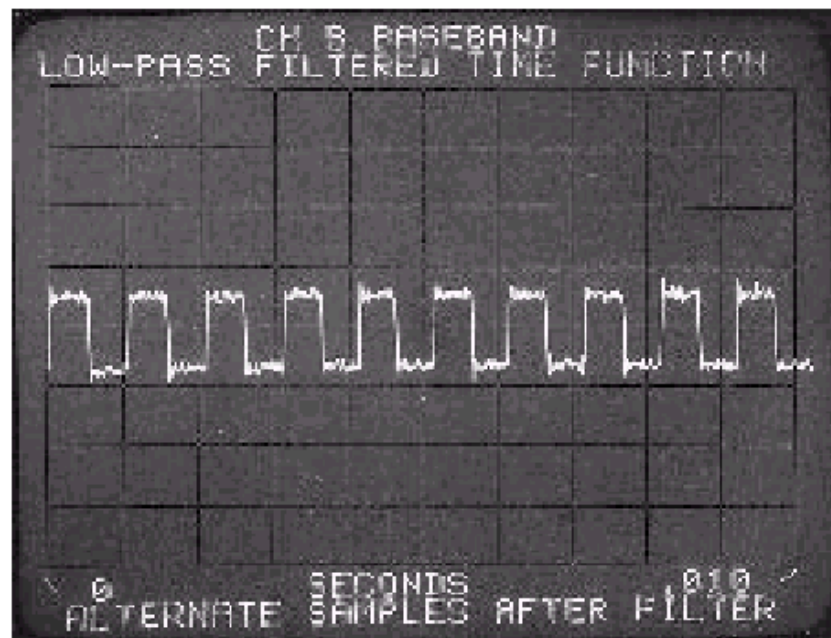
Šum

- Šumovi su neželjeni signali koji prekrivaju i maskiraju signal koji nosi informaciju.
 - Šumovi ambijenta
 - Šumovi usljed varničenja u električnim sistemima
 - Kosmički šumovi
 - Šumovi izvora za napajanje
 - Šumovi kvantizacije
 - Intermodulacioni šumovi
 - Termički šumovi
 - Šumovi poluprovodničkih komponenti
 - Šumovi preslušavanja

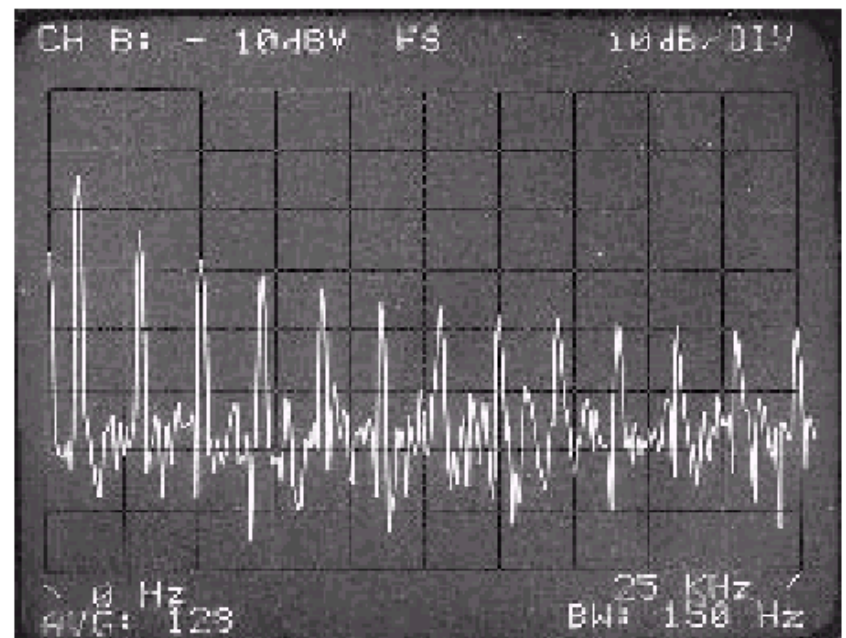
Šum i interferencija

U praktičnim komunikacionim sistemima signali su pod uticajem šuma i interferencije.

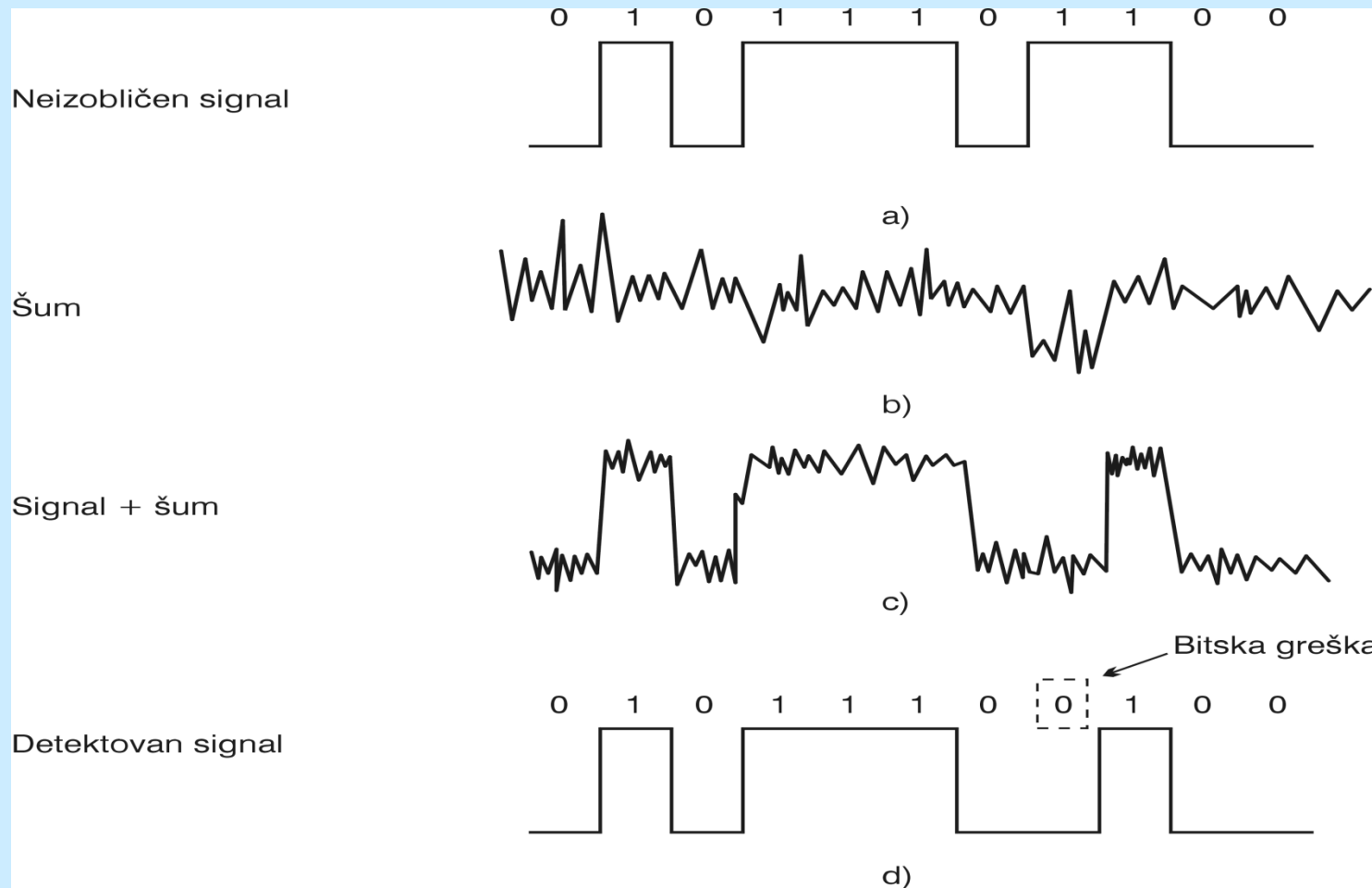
Vremenski domen



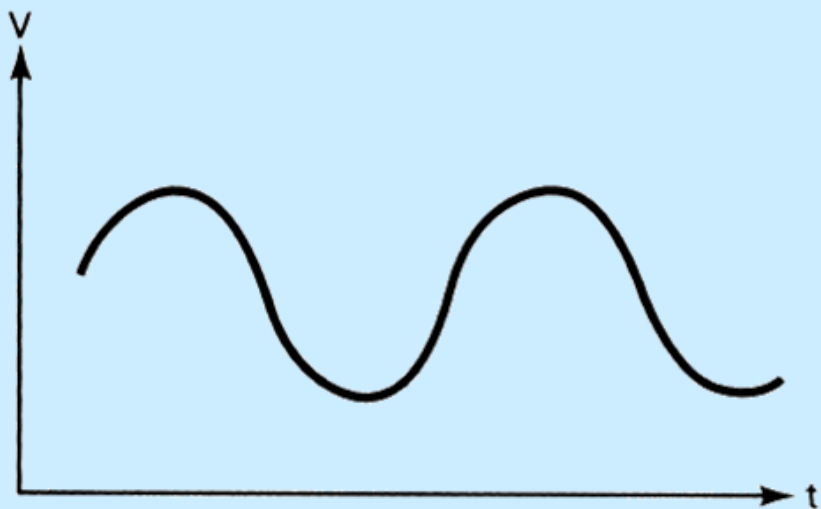
Frekvencijski domen



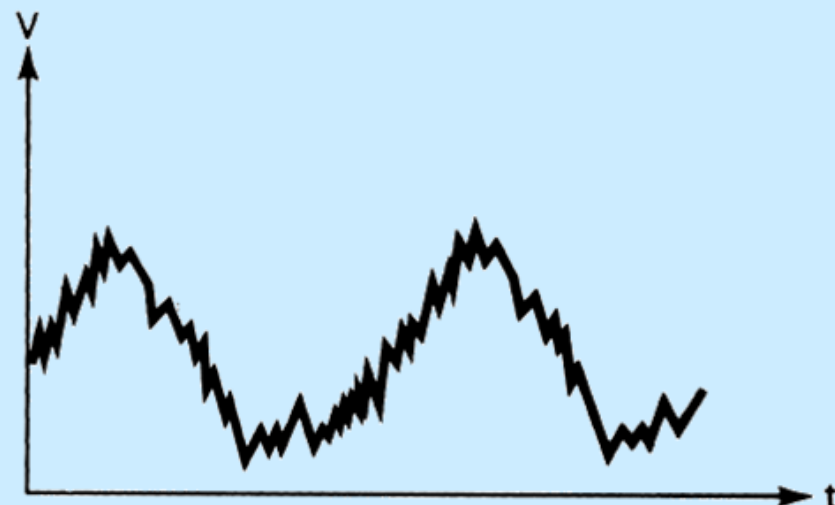
Uticaj šumova



Šum



(a)



(b)

Korelisani šum: povezan sa signalom

Nekorelisani šum: nije povezan sa signalom

Šum

- Korelisani šum
 - Nelinearno izobličenje
 - Harmonijsko izobličenje
 - Intermodulaciono izobličenje
- Nekorelisani šum
 - Vanjski
 - Atmosferski
 - Solarni
 - Kosmički
 - Impulsni
 - Interferencija
 - Interni
 - Termički šum (slučajno kretanje elektrona)**
 - Tranzijentno vrijeme

Termički šum (bijeli šum)

- Slučajan
- Uniformna raspodjela spektralne gustine snage
- Aditivni
- Prisutan u svim uređajima

$$N = KTB$$

N = snaga šuma (W)

B = propusni opseg (Hz)

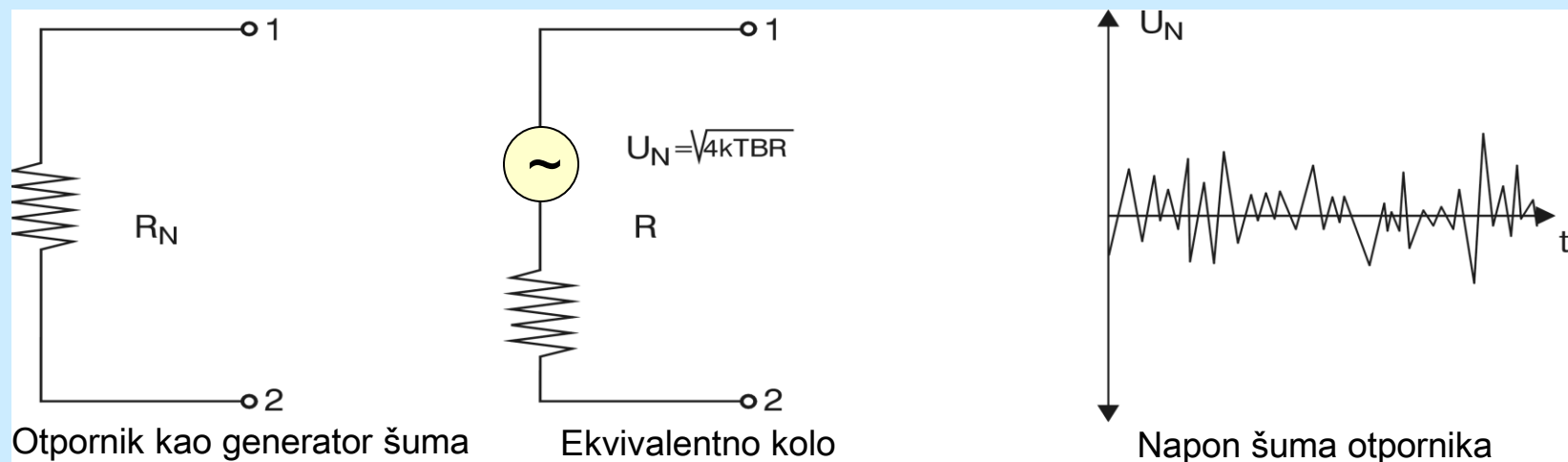
K = Boltzmann-ova konstanta proporcionalnosti
($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T = apsolutna temperatura (Kelvin)

$$N_{(dBm)} = 10 \log \frac{KTB}{0.001} = 10 \log \frac{KT}{0.001} + 10 \log B$$

$$N_{(dBm)} @ 290k = -174 \text{ dBm} + 10 \log B$$

Termički šum (bijeli šum)



- Efektivna vrijednost napona termičkog šuma

$$U_N^2 = 4kTBR \text{ (V)}$$

gdje su:

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ (W sec/K) Bolcmanova konstanta

T [K] - apsolutna temperatura provodnika

B = $f_v - f_n$ [Hz] - frekvencijski opseg sistema

R [Ω] - otpornost provodnika

Šumovi poluprovodničkih komponenti

- Poluprovodničke komponente (diode, tranzistori, FET-ovi, MOSFET-ovi, integrisana kola, ...) generišu šumove.
- Osnovni uzrok: broj slobodnih nosilaca stalno varira pri konstantnim uslovima što je posljedica statističkih pojava generisanja i rekombinacije slobodnih nosilaca; kvadrat efektivne struje šuma je:

$$I_N^2 = 2eIB$$

gde je $e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] – elementarni kvant elektriciteta,

I [A] – jednosmjerna komponenta struje kroz poluprovodnički element,

$B = f_v - f_n$ [Hz] – frekvencijski opseg sistema

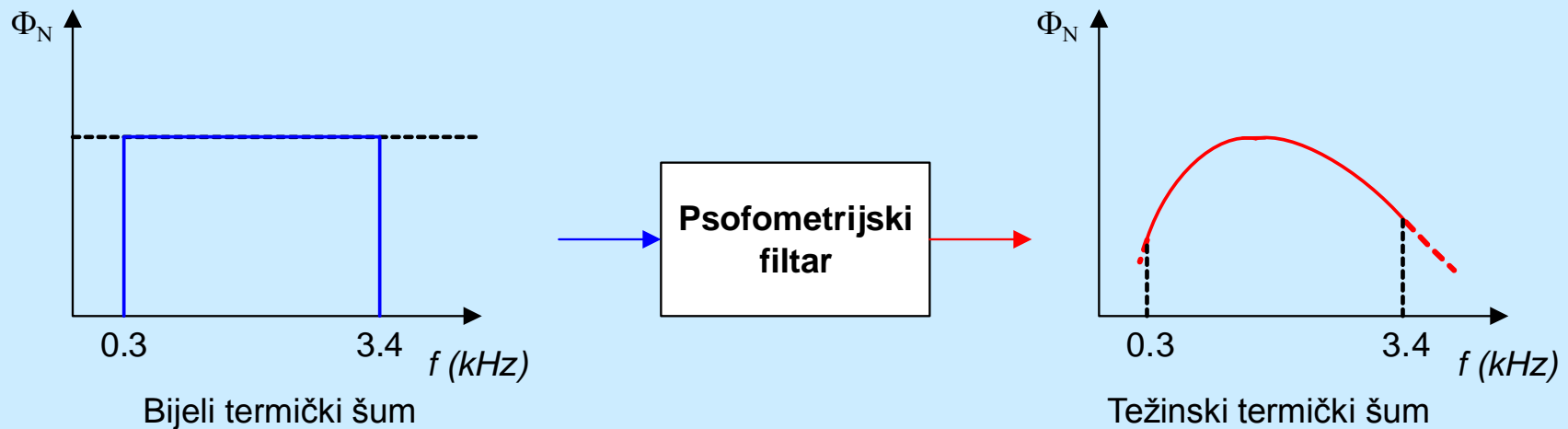
- Na nižim frekvencijama javlja se dodatni šum koji je posljedica površinskih pojava poluprovodnika; raste sa opadanjem frekvencije.
- Na višim frekvencijama javlja se šum prouzrokovan inertnošću difuzije slobodnih nosilaca; raste sa porastom frekvencije.

Šumovi preslušavanja

- Preslušavanje je neželjeni međusobni uticaj signala koji se prenose kroz susjedne kanale.
- Preslušavanje može biti razumljivo i nerazumljivo (manifestuje se kao šum preslušavanja).
- Šumovi preslušavanja potiču od:
 - prelaženja signala iz jednog voda u drugi susjedni preko međusobnih induktivnosti i kapacitivnosti.
 - neidealnih karakteristika filtara koji bi trebalo da izdvoje samo opseg jednog frekvencijskog kanala, ali se u izdvojenom dijelu pojavljuju i dijelovi spektra iz susjednih kanala.
 - preklapanja impulsa sa dijelovima impulsa iz susjednih kanala.

Mjerenje šumova

- Mjerenje se vrši električnim instrumentima: ampermetar, voltmetar, vatmetar.
- U mjerenje se uključuju subjektivne osobine čovječijeg uha koje ima različitu osjetljivost za različite frekvencije tako što se signal prvo propušta kroz psfometrijski filter koji "imitira" osjetljivost uha.
- Jedinica **dBmp** (decibel po milivatu, psfometrijski mjeren).



Φ_N – spektralna gustina snage šuma

Odnos signal/šum

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n}$$

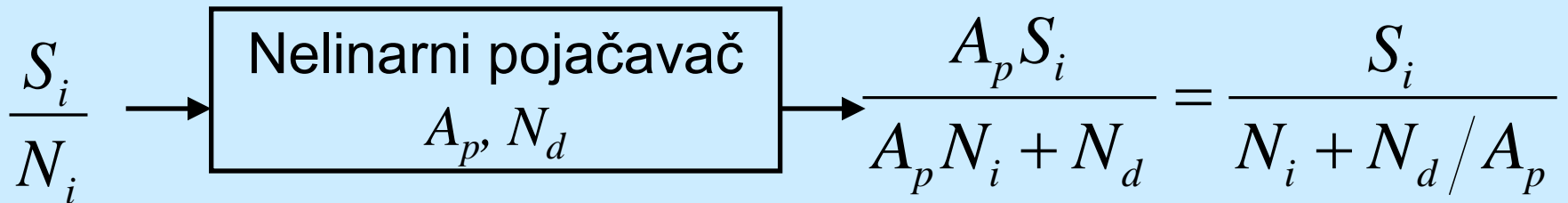
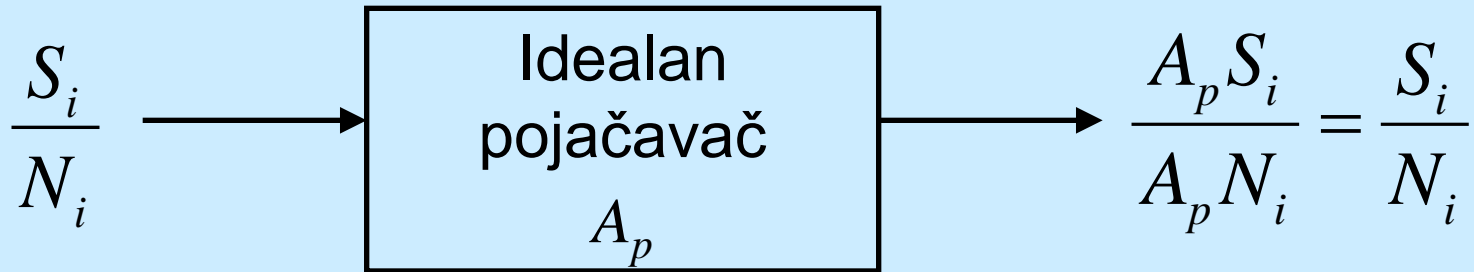
P_s = snaga signala (W)

P_n = snaga šuma (W)

Izraženo u decibelima:

$$\frac{S}{N} (dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_n}$$

Šum u pojačavaču



Faktor šuma

$$F \geq 1$$

$$F = \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{\frac{S_{out}}{N_{out}}} = \frac{S_{in}}{N_{in}} \frac{N_{out}}{S_{out}} = \frac{N_{out}}{A_p N_{in}}$$

$F =$ faktor šuma
(bezdimeenzionalan)

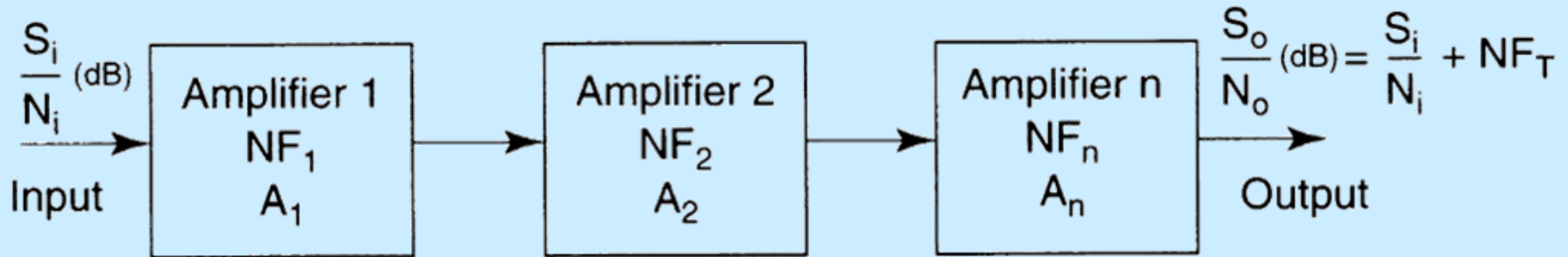


$$F = \frac{\text{ukup an izlazni šum}}{\text{dio izlaznog šuma usljed otpornosti izvora}}$$

$$NF = 10 \log F \quad NF = \text{noise figure (dB)}$$

$$NF \geq 0$$

Faktor šuma kaskade



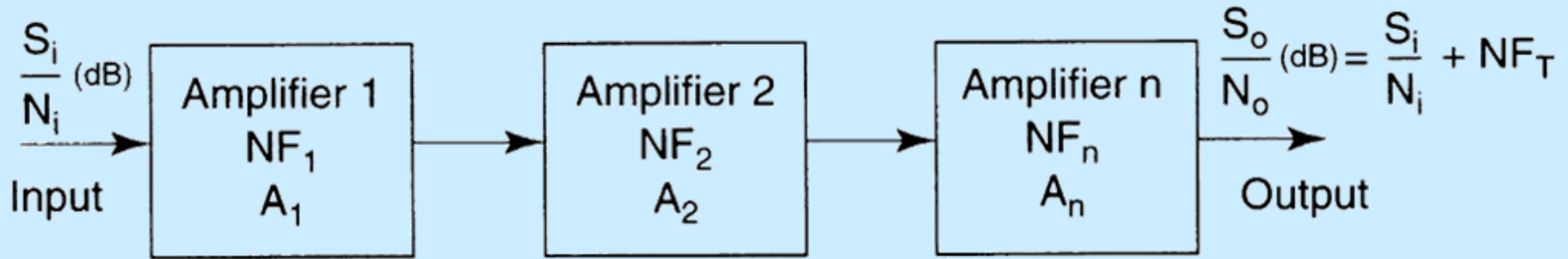
$$F_T = ?$$

F_T = ukupan faktor šuma (bezdimezionalan)

$$NF_T = 10 \log F_T$$

NF_T = total noise figure (dB)

Faktor šuma kaskade



$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{A_1} + \frac{F_3 - 1}{A_1 A_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{A_1 A_2 \cdots A_{n-1}}$$

F_T = ukupan faktor šuma (bezdimezionalan)

$$NF_T = 10 \log F_T$$

NF_T = total noise figure (dB)

Temperaturni šum

$$N = KTB \rightarrow T = \frac{N}{KB}$$

T = temperatura okruženja (290 K)

N = snaga šuma [W]

K = Boltzmann-ova konst. ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

B = propusni opseg [Hz]

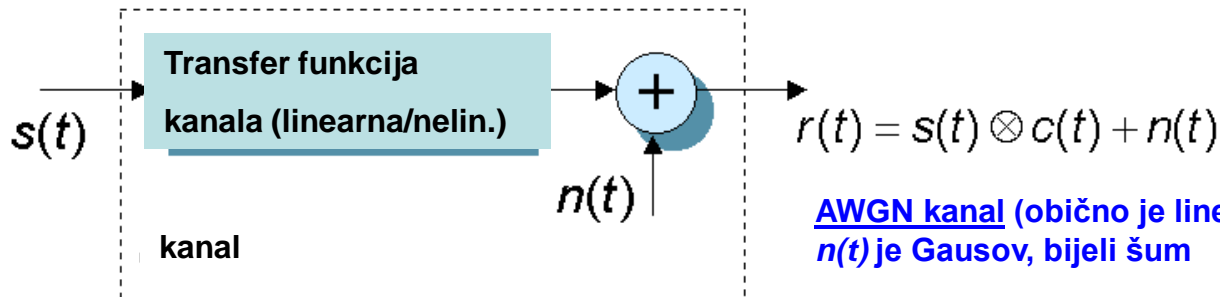
$$T_e = T(F - 1) \quad F = 1 + \frac{T_e}{T} \quad F \geq 1$$

T_e = ekvivalentni temperaturni šum

T = temperatura okruženja (290 K)

F = faktor šuma

Modelovanje kanala prenosa

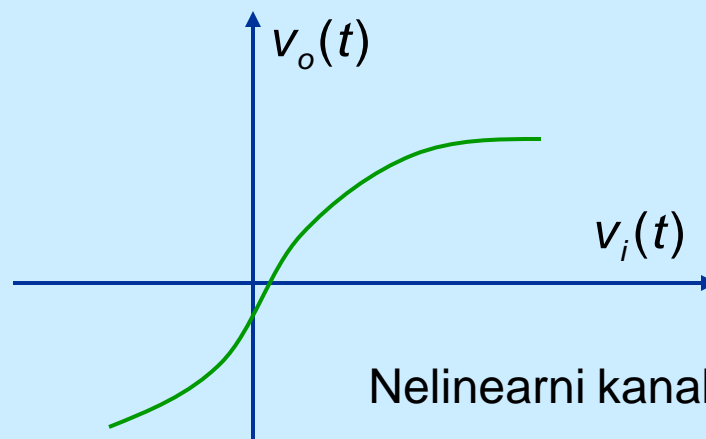
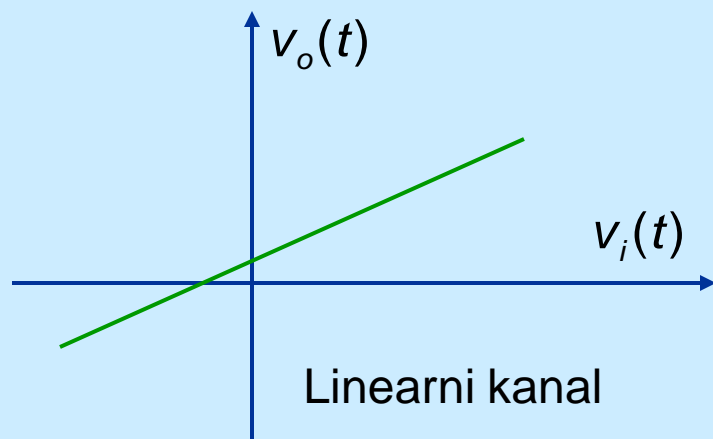


AWGN kanal (obično je linearna transfer funkcija);
 $n(t)$ je Gausov, bijeli šum

- ❑ Informacija se uvijek prenosi u kanalima koji mogu biti radio-putanje (bežični celularni kanal, mikrotalasni link, satelitski link) ili žičani kanali (koaksijalni kabl, optički kabl, talasovod i dr.).
- ❑ Radi jednostavnije analize, uglavnom se pretpostavlja da su kanali pod uticajem **linearnog, aditivnog bijelog Gaus-ovog šuma (AWGN)** ili **linearni fading kanali**.
- ❑ Izlaz AWGN kanala je konvolucija impulsnog odziva kanala $c(t)$ i ulaznog signala $s(t)$, pri čemu je $n(t)$ šum kao aditivna komponenta.

$$r(t) = s \otimes c(t) + n(t) = \int_u s(t)c(\tau - t)dt + n(t)$$

Linearni i nelinearni kanali



- Linearni kanali: $v_o(t) = Kv_i(t) + M$
 - Ne generišu nove frekvencijske komponente
 - Opisuju se transfer funkcijom

Linearni i nelinearni kanali

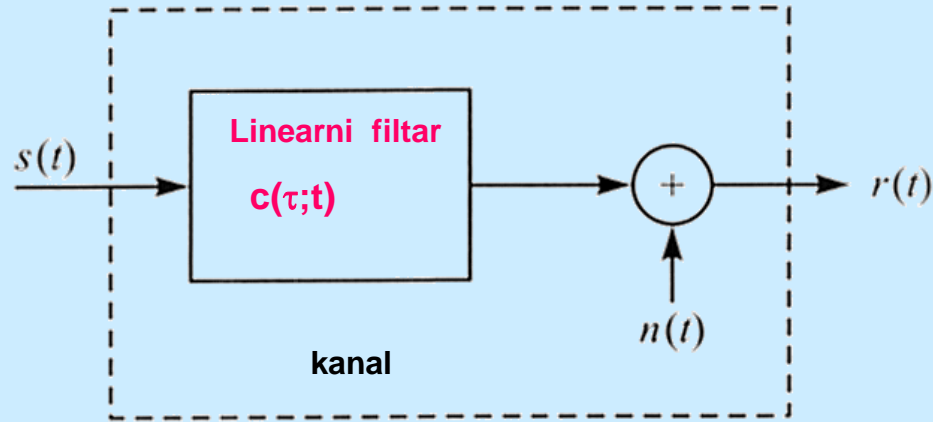
- Nelinearni sistemi mogu generisati nove frekv. komponente, npr:

$$v_o(t) = a_o + \sum_{u=1}^N a_u v_i^u(t) \quad v_i(t) = \sin(\omega t), N = 2$$

$$v_o(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t) + a_2 / 2(1 - \cos(2\omega t))$$

- Nelinearni sistemi:
 - Opisuju se karakteristikama prenosa
 - Često je nelinearnost u prenosu posljedica predajnika ili prijemnika, a ne samog kanala.

Vremenski promjenjivi kanali



- Većina informacionih kanala je vremenski promjenjiva (kablovi, mikrotalasni link, celularni kanal). Prijemni signal je oblika:

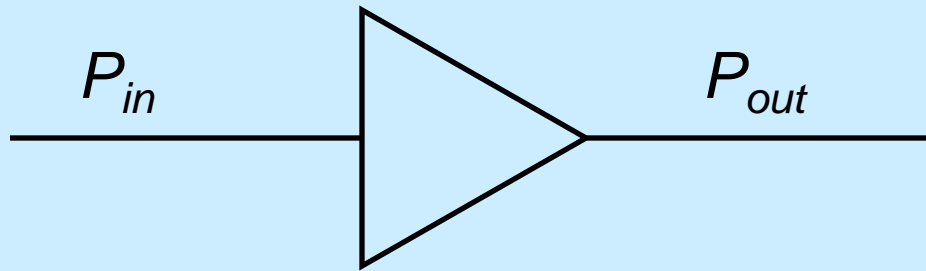
$$r(t) = n(t) + s(t) \otimes c(\tau; t)$$

- U frekvencijskom domenu postoji frekvencijski odziv $C(\tau_1; f) \approx C_1(f)$ pa vrijedi:

$$R_1(f) = N(f) + S(f)C_1(f)$$

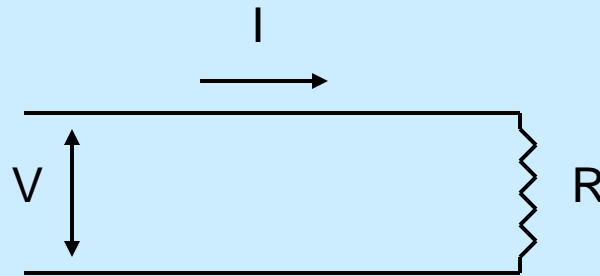
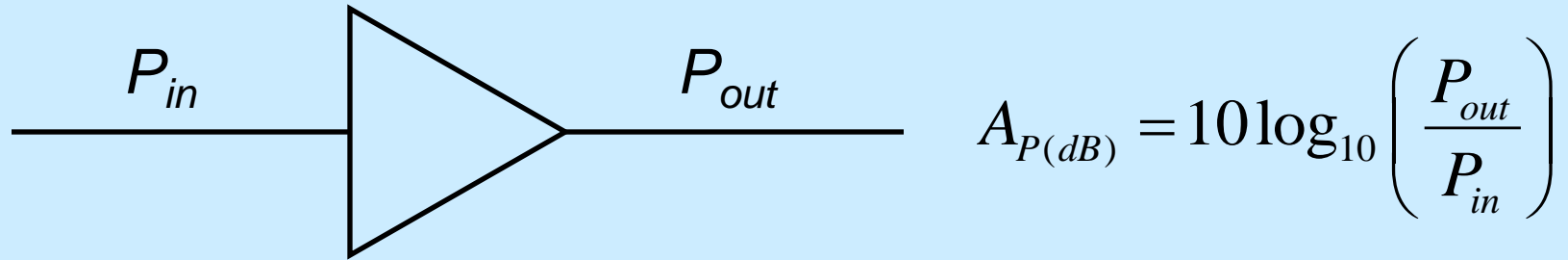
- Varijacije kanala i greške u prenosu se kompenzuju u prijemniku:
 - Ekvalizacijom se ujednačava frekvencijski odziv
 - Pojava grešaka u kanalu može se kompenzovati **kanalnim kodovanjem** (blokovski i konvolucioni kodovi)

Mjerenja snage (dB, dBm)



$$P_{out(dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{0.001 \text{ W}} \right)$$

Mjerenja snage (dB, dBm)



$$V = I \cdot R$$

$$P = V \cdot I$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$A_{P(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{V_{out}^2}{R_{out}}}{\frac{V_{in}^2}{R_{in}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right), \quad R_{in} = R_{out}$$



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission

This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

DBBT

**Digital Broadcasting &
Broadband Technologies**