UNIVERZITET CRNE GORE

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Računarske komunikacije

Prof. dr Enis Kočan (enisk@ucg.ac.me)

Saradnik: Dr Slavica Tomović (slavicat@ucg.ac.me)

SADRŽAJ KURSA

1. Uvod. Osnovni principi računarskih komunikacija
2. **Signali. Vrste prenosa signala. Harmonijska analiza signala**
3. Sistemi prenosa. Izobličenja pri prenosu signala
4. Obrada signala kodiranjem. Uticaj šuma na prenos signala
5. Obrada signala modulacijom. Osnovni tipovi digitalnih modulacija
6. Medijumi za prenos
7. Pravila strukturnog kabliranja
8. Tehnike multipleksiranja. Prenos višestrukim nosiocima
9. Detekcija i korekcija greške. Kontrolni protokoli na nivou linka
10. Tehnike za poboljšanje veze na bežičnom linku. Analiza kvaliteta prenosa (BER, PER, kapacitet sistema)
11. Osnovni parametri fizičkog sloja za IEEE 802.11 grupu standarda
12. Komunikaciona rješenja za IoT mreže
13. Trendovi u računarskim komunikacijama

Termin 2 - Sadržaj

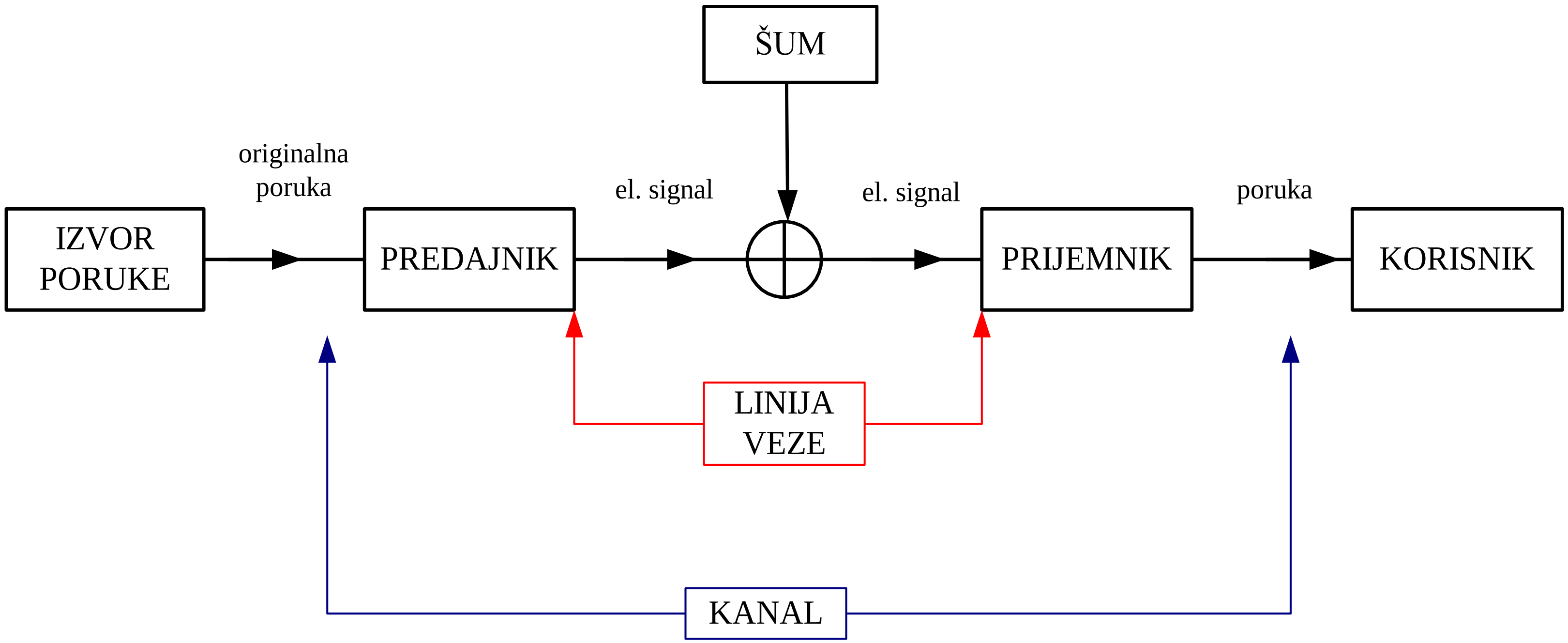
- **Model komunikacionog sistema. Priroda signala**
- Vrste prenosa signala
- Harmonijska analiza periodičnih signala
- Harmonijska analiza aperiodičnih signala

Namjena komunikacionog sistema

- Postupak prenosa poruke se u teoriji komunikacija raščlanjuje na tri koraka:
  1. Formiranje poruke i njeno predstavljanje skupom simbola
  2. Prenos simbola koji predstavljaju poruku, i to sa što je moguće većom tačnošću
  3. Pravilno tumačenje primljene poruke
- Prvi i treći korak spadaju oblast jezičkih, semantičkih ili filozofskih problema, dok je drugi korak tehnički problem.
- Osnovni zadatak telekomunikacionog sistema je da se poruka u vidu signala prenese na udaljeno mjesto, a da pri tome primljeni signal što je moguće više odgovara poslatom signalu.

Model telekomunikacionog sistema

- Jedan od uobičajenih modela za predstavljanje telekomunikacionog sistema je ***Shannon***-ov generalni model



- Poruke su sve ono što se u telekomunikacijama prenosi, a informacija koja se prenosi je sadržana u poruci.
- **Signal** predstavlja električni ili elektromagnetni ekvivalent poruke koja se prenosi.

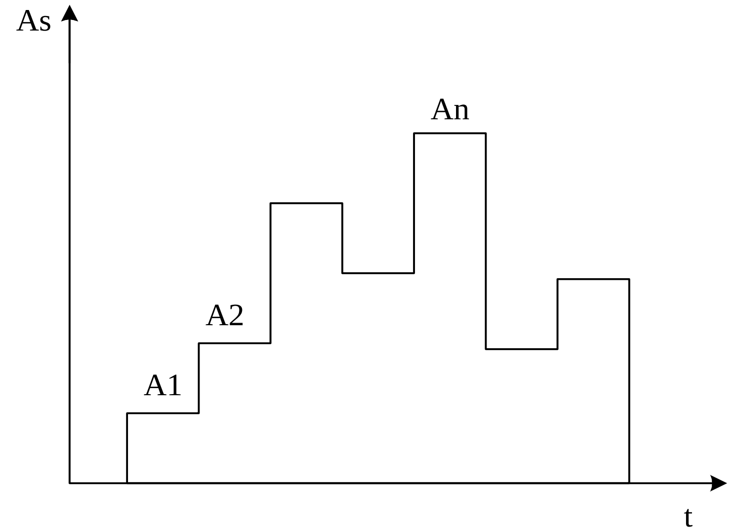
Model komunikacionog sistema

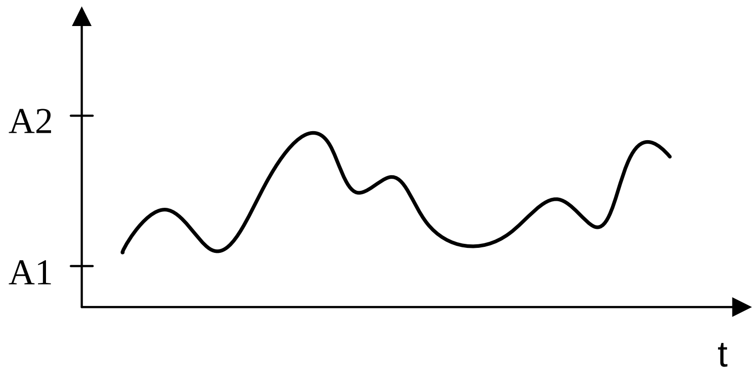
1. **Izvor poruke** – osoba ili uređaj koji generiše poruke (govor, slika, tekst, podaci...) koje treba prenijeti korisniku
2. **Predajnik** - dio telekomunikacionog sistema u kome se vrši konverzija poruke u njen električni ekvivalent koji se naziva električni signal i prilagođenje signala prenosu preko linije veze
3. **Linija veze** (prenosni put, transmisioni medijum) - sredina kroz koju se signal prenosi od predajnika do prijemnika
4. **Šum** - smetnje slučajnog karaktera koje se mogu superponirati sa signalom duž linije veze, i na taj način uticati na oblik signala koji dolazi do prijemnika
5. **Prijemnik** - uređaj koji obavlja operaciju inverznu predajniku: transformiše primljeni signal u poruku što sličniju poslatoj
6. **Korisnik** - osoba, mašina ili objekat kome je poruka namijenjena

Priroda poruka

- Sve poruke koje šalje neki izvor poruka možemo svrstati u dvije grupe:

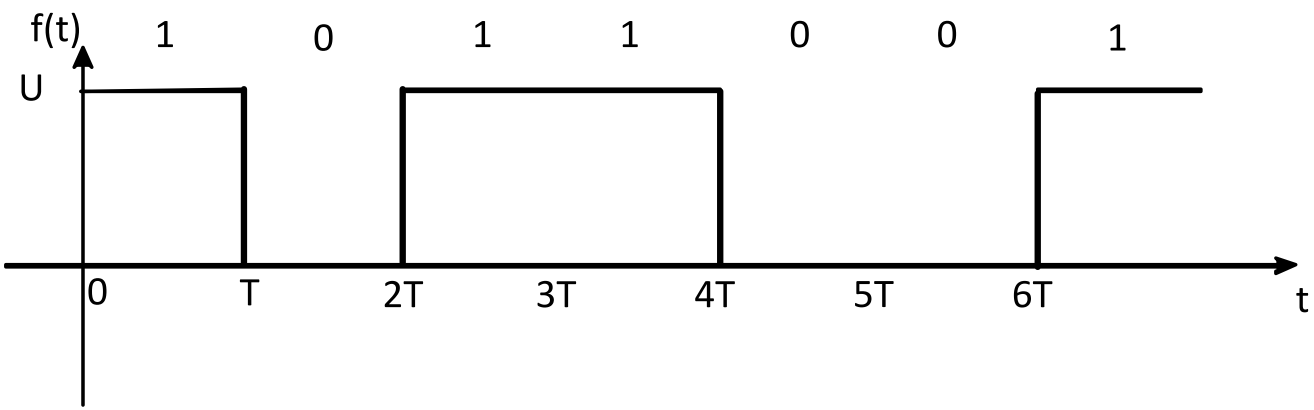
1. ***Diskretne poruke*** – one koje se pojavljuju kao nizovi odvojenih elemenata koji imaju konačan broj različitih vrijednosti. Ti elementi nazivaju se *simbolima* i pripadaju jednom konačnom skupu zvanom *alfabet*. Primjer ovakvih poruka su poruke koje se prenose u telegrafiji i računarskim komunikacijama.
2. ***Kontinualne poruke*** – opisuju se vremenskim funkcijama koje mogu imati sve moguće vrijednosti, koje se nalaze izmedju odredjenih granica. Takve su npr. poruke koje se prenose u telefonskim sistemima ranijih generacija (analogni sistemi).





Vrste signala

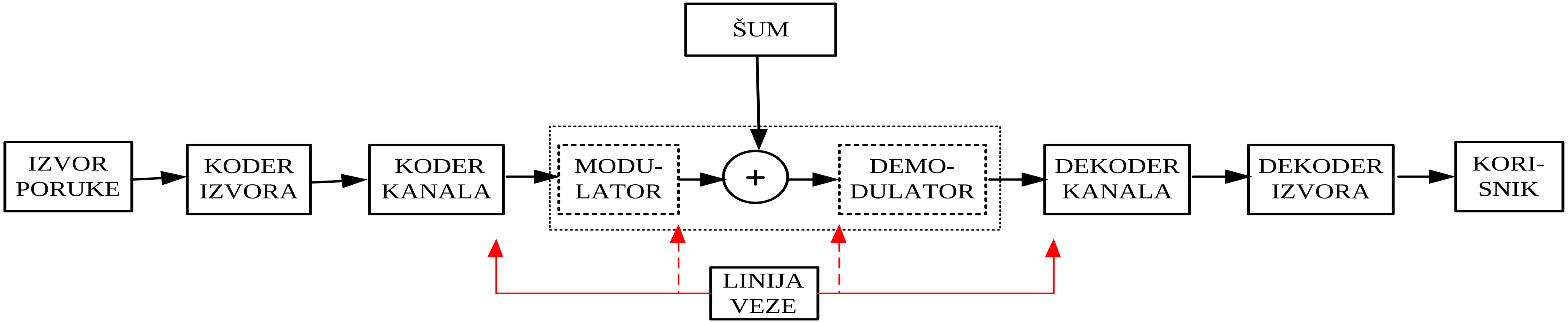
- U zavisnosti od tipa poruke imamo i dvije vrste signala:
  1. Analogne
  2. Digitalne



Primjer digitalnog binarnog signala

Model komunikacionog sistema

- Nakon Shannon-a, koji je dao opšti model telekomunikacionog sistema, predloženi su i drugi, nešto detaljniji modeli. Za prenos <u>digitalnih signala</u> se može koristiti sledeći model:



1. Koder izvora – pretvara poruku u odgovarajući kod (niz simbola iz konačnog skupa različitih simbola) na najefikasniji način

2. Koder kanala – zaštitno kodovanje koje dodaje redudantne bite

3. **Modulator** – obrada signala radi prilagođenja medijumu za prenos

4. **Demodulator** – proces inverzan postupku modulacije

5. Dekoder kanala – primljeni signal pretvara u kodiranu poruku

6. Dekoder izvora – poruku predstavljenu odgovarajućim kodom prevodi u odgovarajući oblik pogodan za korisnika

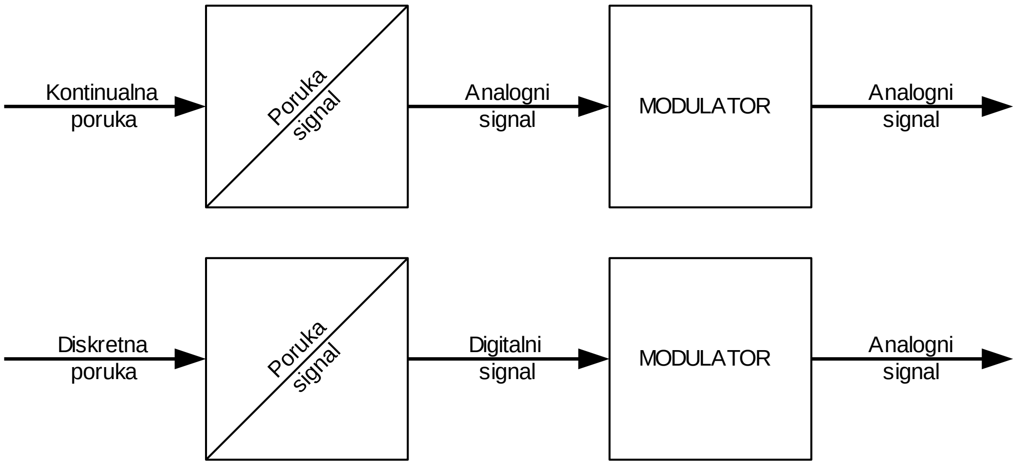
Termin 2 - Sadržaj

- Model komunikacionog sistema. Priroda signala
- **Vrste prenosa signala**
- Harmonijska analiza periodičnih signala
- Harmonijska analiza aperiodičnih signala

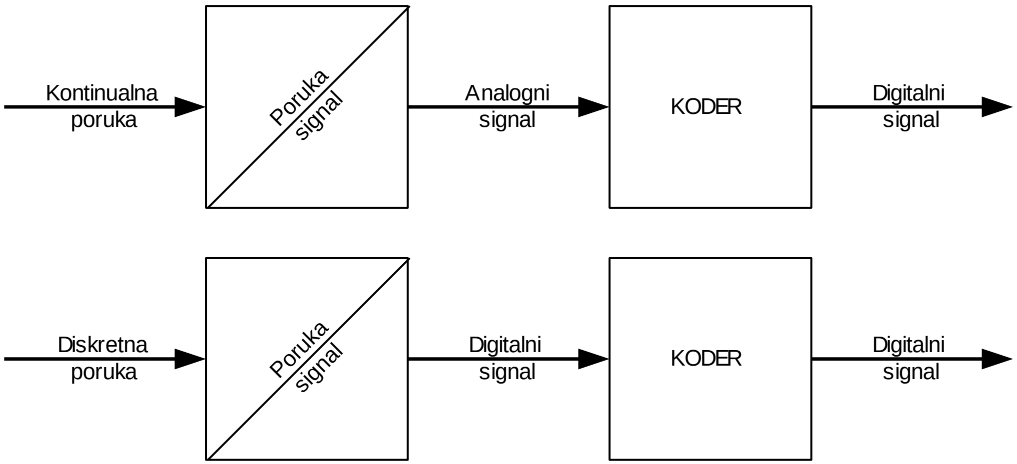
Vrste prenosa signala

- Analogni signal je moguće pretvoriti u digitalni postupkom **kodiranja** (analogno/digitalna konverzija), dok se postupkom **modulacije** pretvara digitalni signal u analogni.

- U zavisnosti od tipa signala koji se prenosi sistemom, govori se i o <u>dvije vrste prenosa signala</u>: analogni i digitalni.



a)



b)

Vrste prenosa

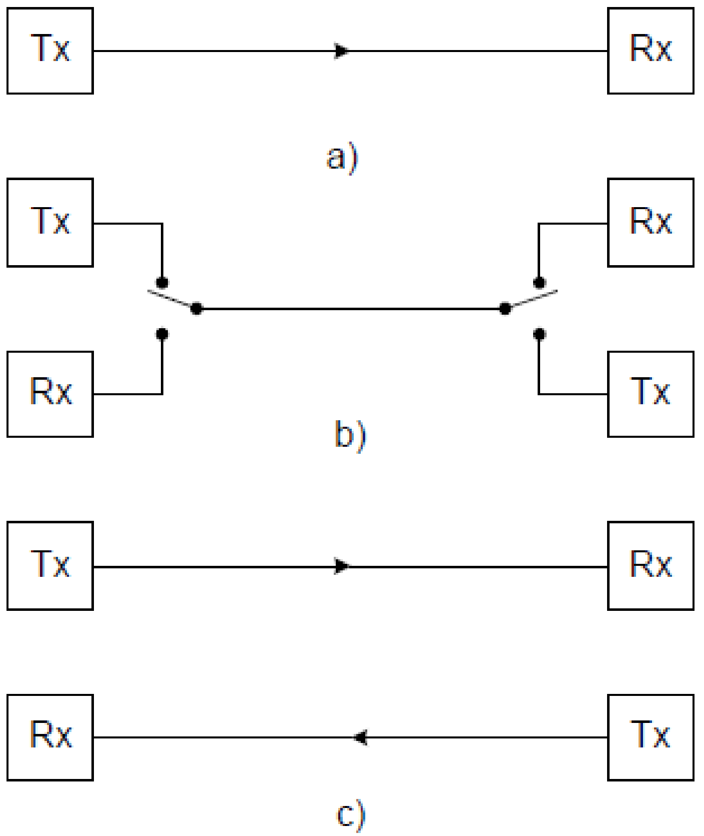
- U zavisnosti od toga da li je moguće na jednoj liniji veze ostvariti istovremenu komunikaciju u oba smjera, razlikujemo sledeće vrste prenosa signala:

Primjeri u računarskim komunikacijama?

a) **Simplex** *(Simplex)* – prenos signala samo u jednom smjeru (jedna stanica je predajnik, a druga prijemnik)

b) **Polu-duplex** *(Half-duplex)* – Moguć je prenos signala u oba smjera, ali ne istovremeno (kada je jedna stanica predajnik, druga je prijemnik, i obratno)

c) **Dupleks** ili **puni dupleks** *(Full-duplex)* – obje stanice mogu istovremeno vršiti i predaju i prijem, koristeći po jedan kanal za svaki smjer prenosa.



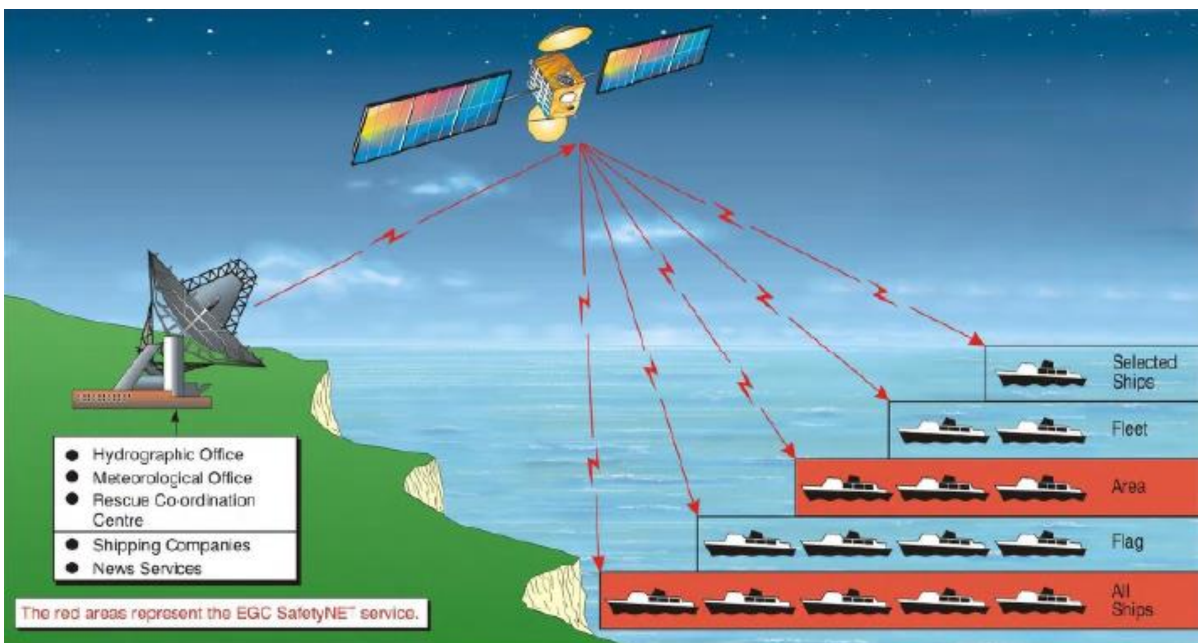
Vrste prenosa

- U zavisnosti od toga kojem broju korisnika (komunikacionih stanica) se šalje poruka, razlikujemo:

  a) **Prenos od tačke do tačke** *(point-to-point transmission)* – gdje se poruka šalje samo jednom korisniku

  b) **Prenos prema grupi korisnika** *(multipoint transmission)* – poruka se šalje <u>određenoj grupi korisnika</u>

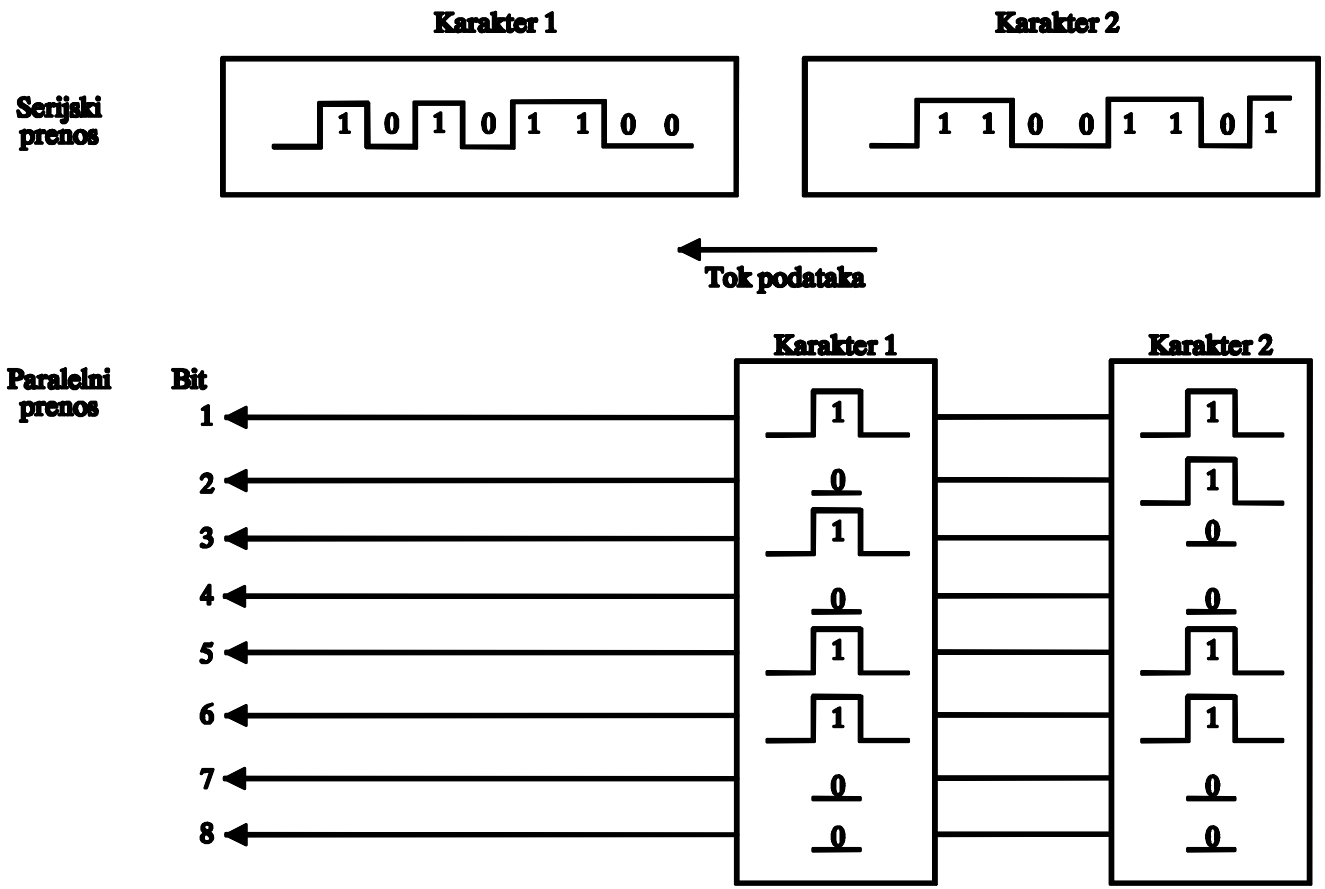
  c) **Difuzni prenos** *(Broadcast transmission)* – poruka se šalje <u>svim korisnicima</u> u određenoj mreži ili u određenoj oblasti pokrivanja telekom. sistema



a)
b)
b)
b)
c)

Vrste prenosa

- Kod <u>digitalnih sistema prenosa</u> se može napraviti podjela i u zavisnosti od toga da li se prenos podataka vrši **serijski** (jedan po jedan simbol se prenosi linkom) ili **paralelno** (više simbola se prenosi istovremeno).



Termin 2 - Sadržaj

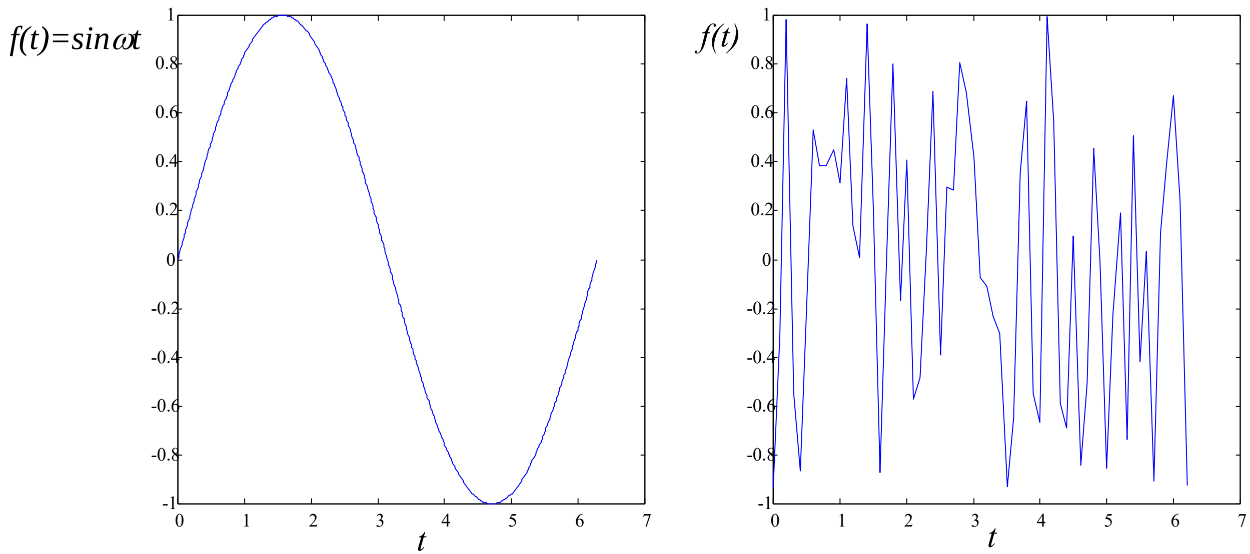
- Model komunikacionog sistema. Priroda signala
- Vrste prenosa signala
- **Harmonijska analiza periodičnih signala**
- Harmonijska analiza aperiodičnih signala

Signali

- Generalno se može govoriti o dvije grupe signala koji se pojavljuju u komunikacionim sistemima:

  \- **determinističkim**, čije su vrijednosti u vremenu opisane preciznim analitičkim izrazom;

  \- **slučajnim**, za koje nije moguće definisati odgovarajući analitički izraz kojim bi se unaprijed opisao njihov vremenski tok.



Primjeri determinističkog i slučajnog signala

Harmonijska analiza determinističkih signala

- **Deterministički** signali:
  - ***periodični***
  - ***aperiodični***

- *Periodični signali*

  f(t)=f(t+T), $- \propto < t < + \propto$

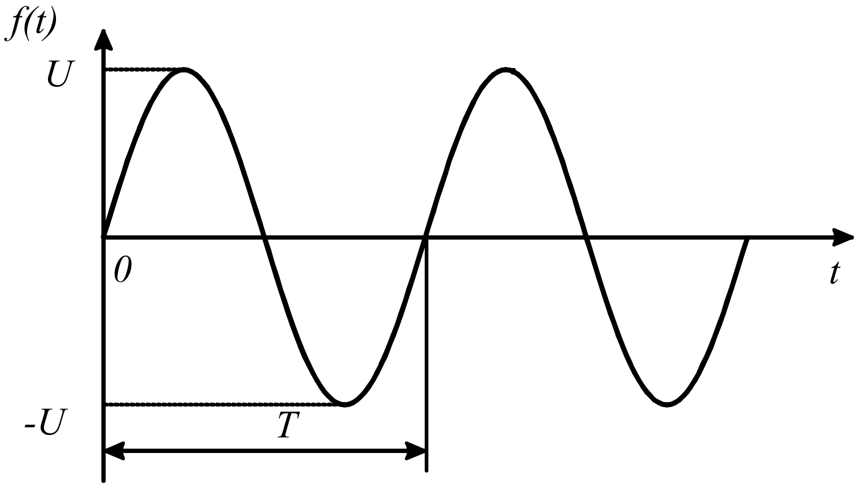
gdje konstanta *T* predstavlja periodu signala.

Primjer:

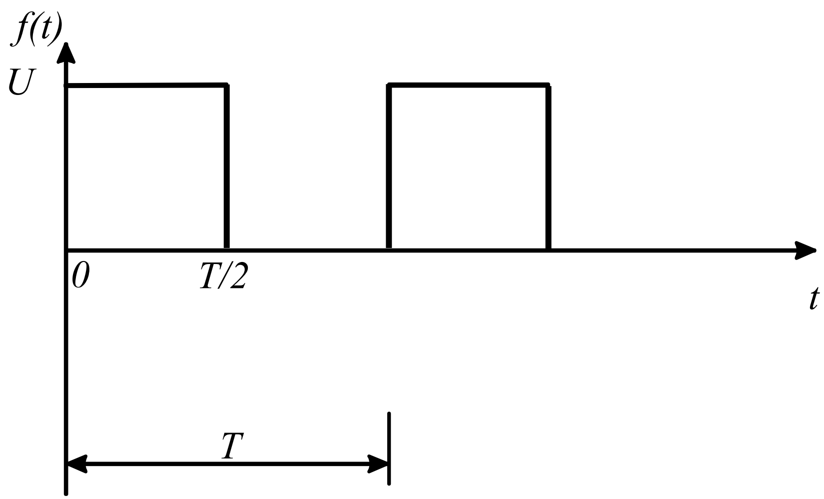
$$f(t) = U \sin(2\pi f t + \varphi) = U \sin(\omega t + \varphi)$$

veličina $\omega = 2\pi f$ naziva se kružna učestanost.

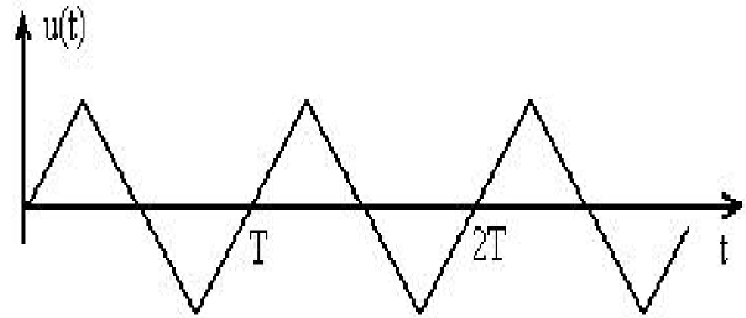
Primjeri periodičnih signala



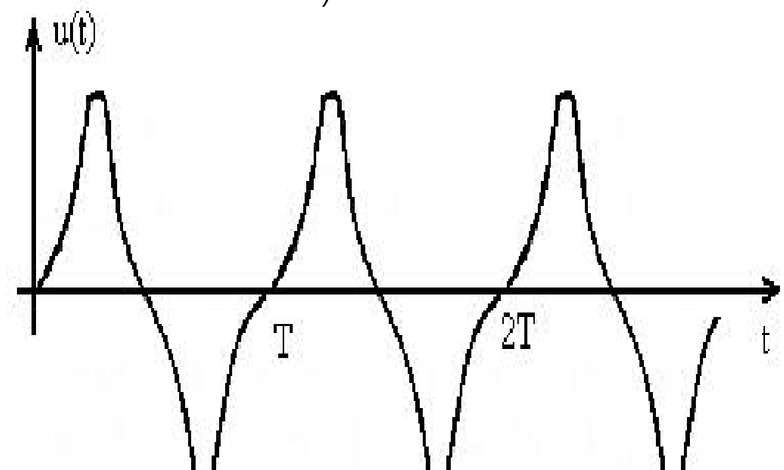
a)



b)



a)

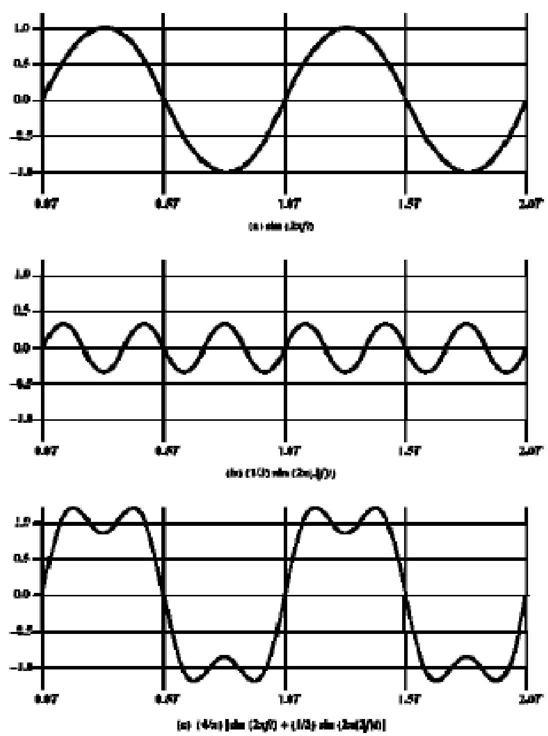


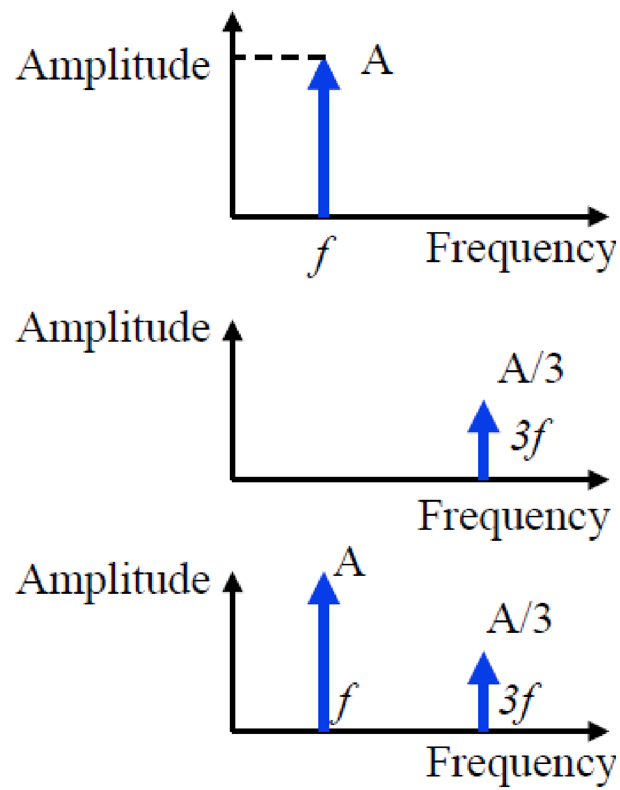
b)

Vremenski domen i domen učestanosti

- Svaki signal se može predstaviti u domenu vremena i u domenu učestanosti (spektar signala - frekvencijski domen)
  - Spektri periodičnih signala su diskretni (linijski)
  - Spektri aperiodičnih signala su kontinualni

- Frekvencijski domen daje predstavu o tome koliko brzo se signal mijenja u domenu vremena





Amplitudski spektar periodičnih signala

- Svaka periodična funkcija, koja nije neograničena, može se razviti u Fourier-ov red:

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} 2|F_n| \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$ - Trigonometrijski oblik

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} F_n e^{jn\omega_0 t}$$ - Kompleksni oblik

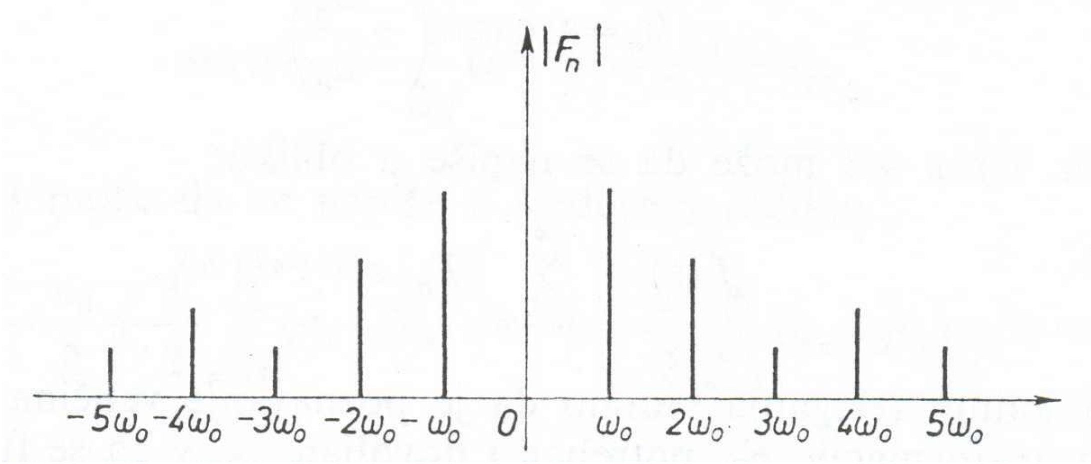
- Fourier-ovi koeficijenti se računaju prema izrazu:

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \qquad F_n = |F_n| e^{j\theta_n}$$

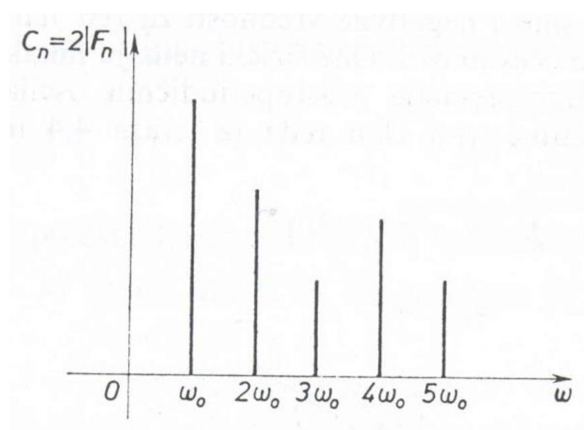
http://www.falstad.com/fourier/index.html

Jednostrani i dvostrani spektar

- Uobičajeno je da se vrši grafičko prikazivanje signala u domenu frekvencija, i to posebno amplitudskog i faznog spektra. Postoje dva načina:
  1. i za pozitivne i negativne učestanosti (dvostrani spektar)
  2. samo za pozitivne učestanosti, s tim što je amplituda odgovarajućeg harmonika 2 puta veća (jednostrani spektar).
- <u>Kompleksni spektri periodičnih signala su diskretni</u>, pa se nazivaju ***diskretnim*** ili ***linijskim*** spektrima.

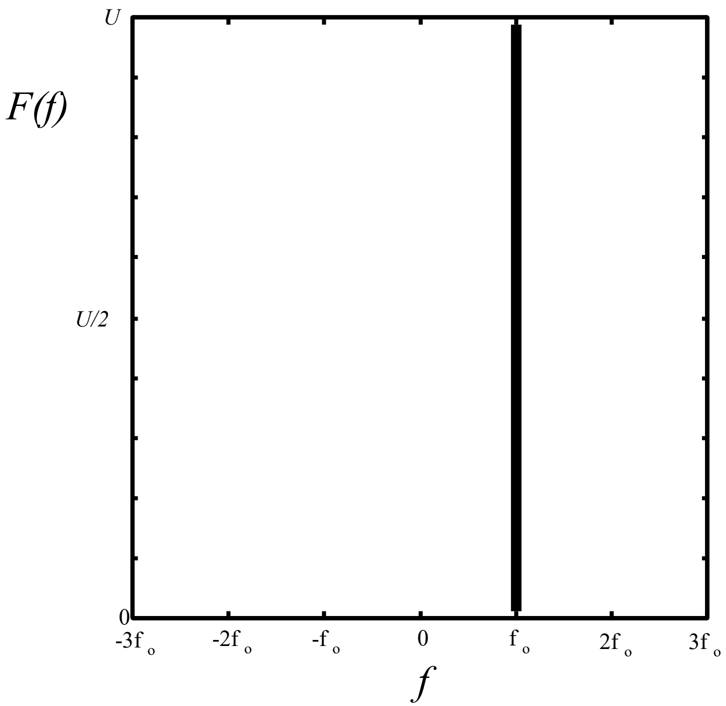


Dvostrani amplitudski spektar

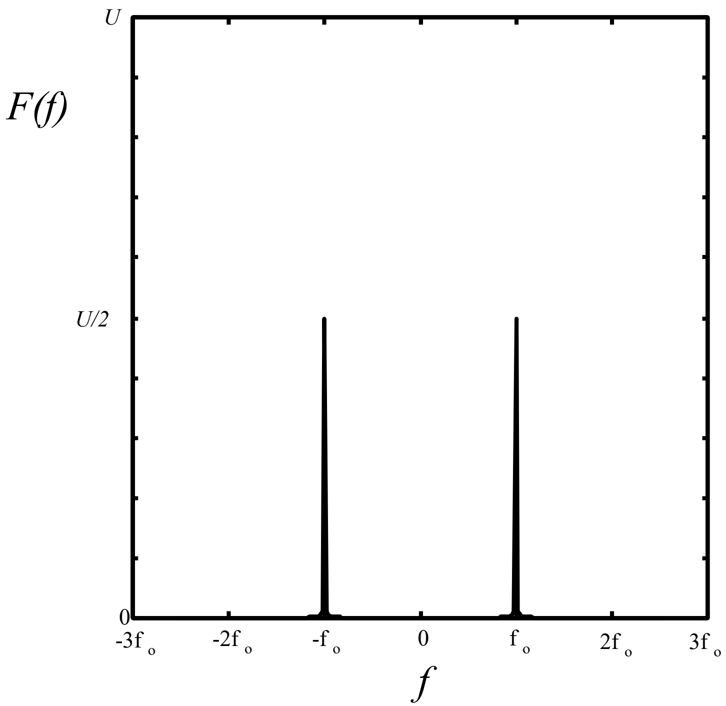


Jednostrani amplitudski spektar

Jednostrani i dvostrani spektar



Jednostrani amplitudski spektar prostoperiodičnog signala



Dvostrani amplitudski spektar prostoperiodičnog signala

Korelacija periodičnih signala

- U opštoj harmonijskoj analizi periodičnih signala poseban značaj ima pojam ***korelacije*** koja povezuje dva periodična signala.
- Korelacija predstavlja mjeru zavisnosti dva signala. Ako su signali potpuno međusobno nezavisni, onda se kaže da su nekorelisani.
- Neka su signali opisani funkcijama $f_1(t)$ i $f_2(t)$ koje imaju istu periodu **T=2π/ω₀**. Fourrierove transformacije ovih funkcija su:

$$F_{n1} = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_1(t) e^{-jn\omega_0 t}\,dt \qquad F_{n2} = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_2(t) e^{-jn\omega_0 t}\,dt, \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

Korelacija periodičnih signala

- Njihova korelacije se definiše na sledeći način:

$$R_{12}(\tau)=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_1(t)f_2(t+\tau)dt, \qquad -\infty<\tau<\infty$$

τ predstavlja kontinualni pomjeraj u vremenu u intervalu od -∞ do ∞, pri čemu τ ne zavisi od *t.*

Traženje korelacije dva signala podrazumijeva tri koraka:

1. Pomjeranje jedne od funkcija u vremenu za τ
2. Množenje te pomjerene funkcije drugom funkcijom iste periode
3. Izračunavanje srednje vrijednosti tog proizvoda u toku jedne periode

Konvolucija periodičnih signala

- Ako imamo dva periodična signala $f_1(t)$ i $f_2(t)$ iste periode T=2π/ω_0, tada se integral:

$$\rho_{12}(\tau) = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f_1(t) f_2(\tau - t)\,dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{n1} F_{n2} e^{jn\omega_0\tau}$$

zove **konvolucija** signala $f_1(t)$ i $f_2(t)$. Lako se pokazuje da važi:

$$F_{n1} F_{n2} = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \rho_{12}(\tau) e^{-jn\omega_0\tau}\,d\tau$$

Teorema o konvoluciji periodičnih funkcija:

- Konvolucija $\rho_{12}(\tau)$ funkcija $f_1(t)$ i $f_2(t)$ i proizvod njihovih kompleksnih spektara $F_{n1}F_{n2}$ obrazuju Fourrierov transformacioni par.

Konvolucija periodičnih signala

Slično korelaciji i kod konvolucije imamo tri operacije:

1. Pomjeranje funkcije $f_2(t)$ u vremenu za τ i njeno preslikavanje simetrično u odnosu na ordinatnu osu
2. Množenje tako dobijene funkcije sa periodičnom funkcijom $f_1(t)$
3. Izračunavanje srednje vrijednosti tog proizvoda u toku jedne periode

Osobine konvolucije:

- Konvolucija periodičnih funkcija je periodična funkcija čija je perioda jednaka periodi signala $f_1(t)$ i $f_2(t)$, a njen kompleksni spektar je jednak proizvodu $F_{n1}F_{n2}$.

- Važi relacija: $\rho_{12}(\tau) = \rho_{21}(\tau)$

Termin 2 - Sadržaj

- Model komunikacionog sistema. Priroda signala
- Vrste prenosa signala
- Harmonijska analiza periodičnih signala
- **Harmonijska analiza aperiodičnih signala**

Fourrierov integral

- Aperiodični deterministički signali mogu se opisati funkcijama koje su aperiodične u vremenskom domenu, tj. funkcijama za koje ne važi ***f*****(t)=*****f*****(t+T)**.

- Aperiodični signal se ne može razviti u Fourier-ov red, pa se analiza aperiodičnog signala u domenu učestanosti obavlja pomoću Fourier-ovih integrala, čime se kompleksni spektar signala *f(t)* dobija pomoću direktne Fourier-ove transformacije:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Ovaj izraz predstavlja ***Fourrierov integral za aperiodičnu funkciju***, pri čemu je uslov za njegovu egzistenciju:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad \text{ili} \quad \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty$$

Spektralna gustina amplituda i faza

- Analogno predstavljanju periodične funkcije u obliku Fourrierovog reda, dobija se ***Fourrierov transformacioni par za aperiodičnu funkciju*** *f*(t)***:***

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

$$F(j\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}dt$$

F(jω) je ***Fourrierova transformacija aperiodične funkcije*** *f*(t), i ona je kontinualna funkcija učestanosti ω. Funkcija *f*(t), je ***inverzna Fourrierova transformacija funkcije*** F(jω).

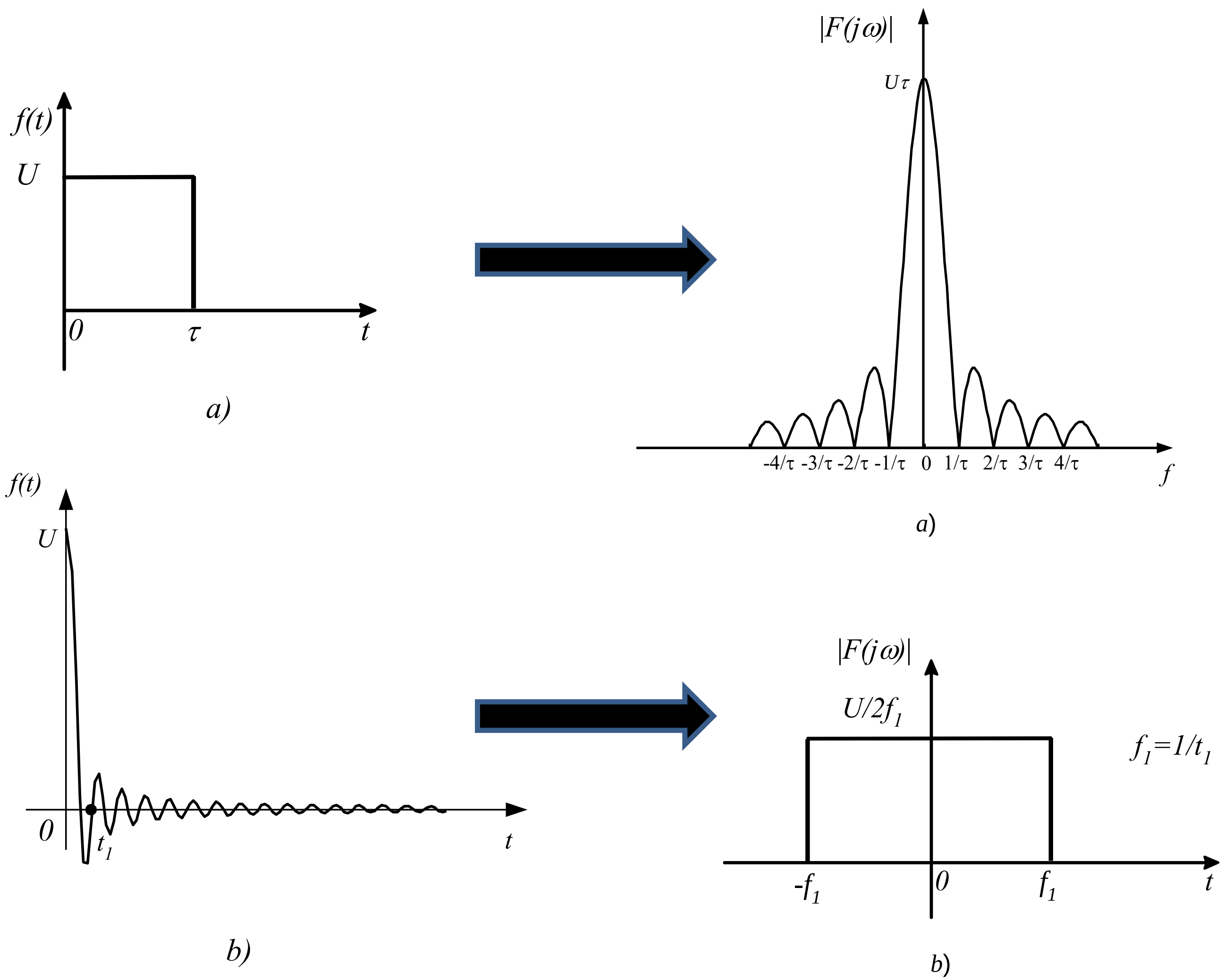
|F(jω)| - **spektralna gustina amplituda** aperiodičnog signala *f*(t) (uvijek parna funkcija)

$$F(j\omega)=|F(j\omega)|e^{j\theta(\omega)}$$

θ(ω) - **spektralna gustina faza** aperiodičnog signala *f*(t), (uvijek neparna funkcija).

Ove dvije veličine za aperiodične funkcije su ***kontinualne***.

Spektralna gustina amplituda



Korelacija aperiodičnih signala

- Za dvije aperiodične funkcije $f_1(t)$ i $f_2(t)$ izraz:

$$R_{12}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t+\tau) dt$$

se naziva ***korelacionom funkcijom*** aperiodičnih signala $f_1(t)$ i $f_2(t)$.
Korelacija dva signala podrazumijeva tri koraka:

1. Pomjeranje jedne funkcije u vremenu za τ
2. Množenje te pomjerene funkcije drugom funkcijom
3. Izračunavanje integrala proizvoda takve dvije funkcije

Neka funkcije $f_1(t)$ i $f_2(t)$ imaju Fourrierove transformacije $F_1(j\omega)$ i $F_2(j\omega)$.
Prema definiciji, njihova korelacija je:

$$R_{12}(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) dt \int_{-\infty}^{\infty} F_2(j\omega) e^{j\omega(t+\tau)} d\omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_2(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{j\omega t} dt$$

$$R_{12}(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_1^*(j\omega) F_2(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

Konvolucija aperiodičnih signala

- Izraz čiji je oblik:

$$\rho_{12}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} f_1(t)f_2(\tau-t)dt=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\omega)F_2(j\omega)e^{j\omega\tau}d\omega$$

naziva se ***konvolucijom aperiodičnih funkcija*** *f_1*(t) i *f_2*(t) ili ***konvolucionim integralom***. Konvolucija podrazumijeva sledeća tri koraka:

1. jedna od funkcija se pomjera u vremenu za τ i prelazi u lik simetričan u odnosu na ordinatnu osu
2. tako dobijena funkcija množi se drugom funkcijom
3. računa se integral njihovog proizvoda u neograničenom intervalu

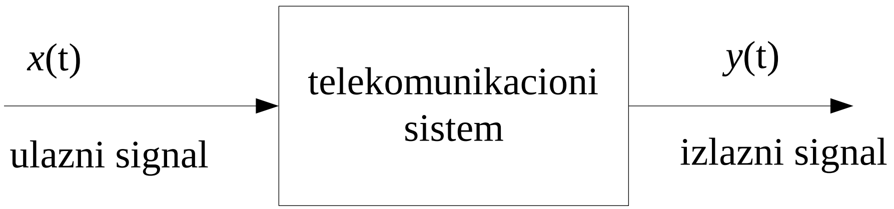
$$\rho_{12}(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\omega)F_2(j\omega)e^{j\omega\tau}d\omega$$

$$F_1(j\omega)F_2(j\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} \rho_{12}(\tau)e^{-j\omega\tau}dt$$

Teorema o konvoluciji aperiodičnih funkcija:
Konvolucija dvije aperiodične funkcije *$\rho_{12}(\tau)$* i proizvod *$F_1(j\omega)\cdot F_2(j\omega)$* obrazuju Fourrierov transformacioni par.

Uloga i značaj harmonijske analize determinističkih signala

- Osnovna uloga harmonijske analize je da se vremenska funkcija, koja opisuje signal, predstavi u domenu učestanosti podesno izabranim parametrima kako bi se omogućilo analitičko praćenje prenosa signala telekomunikacionim sistemima.
  - Na taj način se stvaraju uslovi za utvrdjivanje nivoa tačnosti u prenosu signala, odnosno kvaliteta sa kojim se odredjenim sistemom prenose informacije.
- Eventualne promjene u signalu tokom njegovog prenosa se utvrdjuju na osnovu uporedjivanja signala na ulazu u sistem (pobuda) sa signalom na izlazu iz sistema (odziv).
  - Upravo primjena harmonijske analize omogućava ovo uporedjenje na relativno jednostavan način, odnosno nalaženje medjusobnog odnosa odziva i pobude sistema.



Veliki broj sklopova telekomunikacionih sistema su po svom opštem karakteru ***linearne mreže sa konstantnim parametrima***:

- ***mreže sa konstantnim parametrima*** **-** mreže koje imaju osobinu da ako pobudnom signalu *x*(t) odgovara izlazni signal *y*(t), onda pobudnom signalu *x*(t+τ) odgovara izlazni signal *y*(t+τ). (Ove mreže se nazivaju i ***vremenski invarijantne mreže***).

- ***linearne mreže*** - mreže koje imaju osobinu da, ako se za pobudni signal x_i(t) dobija izlazni signal y_i(t), onda ulazni signal oblika:

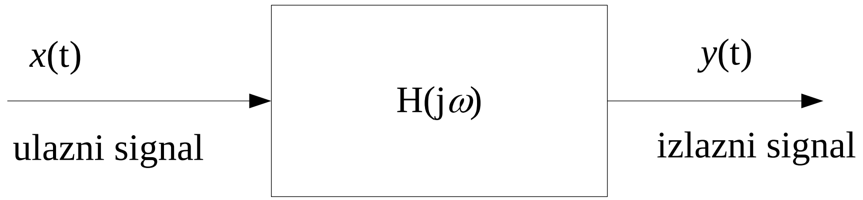
$$x(t)=\sum_{i=1}^{n} a_i x_i(t)=a_1 x_1(t)+a_2 x_2(t)+\ldots+a_n x_n(t)$$

dovodi do izlaznog signala oblika:

$$y(t)=\sum_{i=1}^{n} a_i y_i(t)=a_1 y_1(t)+a_2 y_2(t)+\ldots+a_n y_n(t)$$

Osnovna osobina linearnih mreža sa konstantnim parametrima je da se u njima **ne generišu novi harmonici signala tokom prenosa**, tj. sve promjene na prenošenom signalu se dešavaju na nivou njegovih amplituda i faza, ali ne i na nivou njegovih učestanosti.

Prenosna (transfer) funkcija linearnih mreža sa konstantnim parametrima:



$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\chi(\omega)}$$

gdje se sa:

- $|H(j\omega)|$ **modeluju promjene amplitude signala**
- $\chi(\omega)$ **modeluju promjene faze signala**
- Odziv sistema (signal na njegovom izlazu) može naći u:

1. domenu učestanosti ili
2. domenu vremena

s tim što se u oba slučaja primjenjuje harmonijska analiza.

Nalaženje odziva sistema u domenu učestanosti

1. Ako je ulazni signal x(t) opisan nekom periodičnom vremenskom funkcijom složenog talasnog oblika, onda se Fourrierovom analizom može predstaviti Fourrierovim redom kao suma harmonika (prosto periodičnih funkcija-sinusoida):

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{jn\omega_0 t}$$

- Pošto za linearne mreže sa konstantnim parametrima važi zakon superpozicije, to se uticaj mreže na svaku sinusoidalnu komponentu može zasebno posmatrati. Drugim riječima, poznavanje funkcije prenosa H(jω), za sve odgovarajuće vrijednosti ω, omogućava da se pronađu spektralne komponente (harmonici) izlaznog signala

$$Y_n = H(j\omega)X_n = H(jn\omega_0)X_n$$

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n e^{jn\omega_0 t}$$

2. Ako je ulazni signal opisan nekom aperiodičnom vremenskom funkcijom x(t), i Fourrierova transformacija ove funkcije je *X*(jω). Tada se signal *x*(t) može izraziti inverznom transformacijom svog kompleksnog spektra *X*(jω):

$$x(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}X(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

Izlazni signal u domenu učestanosti, odnosno njegov kompleksni spektar, se nalazi kao:

$$Y(j\omega)=H(j\omega)X(j\omega)$$

Na osnovu prethodnog, i poznavanja prenosne funkcije sistema, analitički izraz za izlazni signal u domenu vremena se dobija kao:

$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(j\omega)X(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

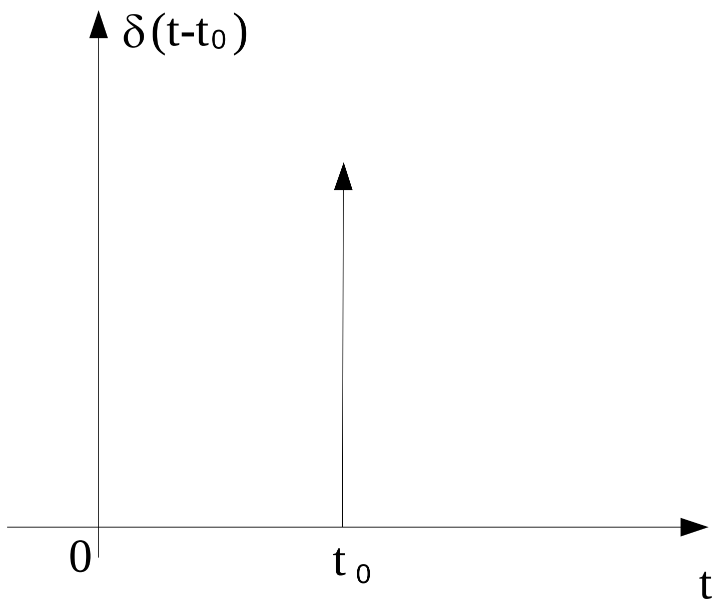
Zaključak: ako je poznat odziv linearne mreže sa konstantnim parametrima čitavom skupu sinusoidalnih pobuda svih mogućih učestanosti, tada se odziv te iste mreže na bilo koji drugi pobudni signal može jednoznačno odrediti.
Za obje klase determinističkih signala, periodične i aperiodične, zahvaljujući harmonijskoj analizi, proučavanje njihovog prenosa svodi se u suštini na poznavanje odziva mreže sinusoidalnoj pobudi, odnosno na poznavanje karakteristika mreže u stacionarnom režimu.

- **Odziv sistema u domenu učestanosti se nalazi na sledeći način:**

1. **Definiše se pobuda u domenu učestanosti: X_n ili $X(j\omega)$**
2. **Odredi se proizvod funkcije prenosa sistema i spektra pobude ($H(j\omega)X_n$ ili $H(j\omega)X(j\omega)$) čime se dobija odziv u domenu učestanosti :Y_n ili $Y(j\omega)$**
3. **Inverznom Fourrierovom transformacijom određuje se analitički oblik izlaznog signala (odziva) u domenu vremena**

Nalaženje odziva sistema u domenu vremena

- **Transfer (prenosna) funkcija sistema *H(jω)*** može da se definiše kao odziv sistema na pobudu u vidu Dirakovog (delta) impulsa.

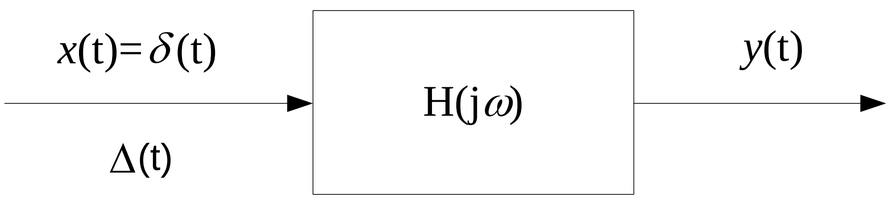


$$\delta(t-t_0)=\begin{cases}\infty & t=t_0\\ 0 & t\neq t_0\end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t-t_0)dt=1$$

$$\Delta(j\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)e^{-j\omega t}dt=1$$

$$Y(j\omega)=H(j\omega)\Delta(j\omega)=H(j\omega)$$



$$y(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

$$y(t)=h(t)$$

$$h(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

$$H(j\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}h(t)e^{-j\omega t}dt$$

Zaključak:

h(t) se naziva ***impulsni odziv sistema***. Ukoliko je on poznat može se naći odziv mreže *y*(t) na bilo koju pobudu *x*(t).

$$y(t)=\int_{-\infty}^{\infty}h(\mu)x(t-\mu)d\mu=\int_{-\infty}^{\infty}x(\mu)h(t-\mu)d\mu$$

Izlazni signal je ***konvolucija*** ulaznog signala i impulsnog odziva sistema!!!

Osnovne karakteristike signala koji predstavljaju realne poruke

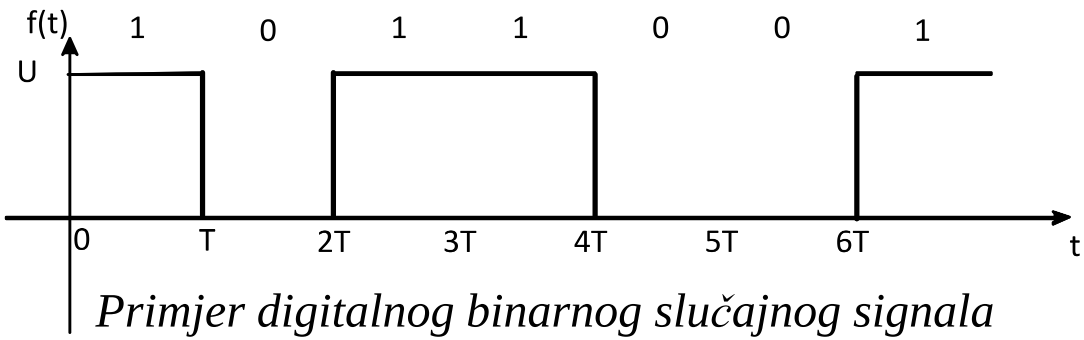
1. SIGNAL GOVORA
   - Opseg učestanosti od 300Hz do 3400Hz usvojen je od strane CCITT-a (ITU) za standardnu širinu kanala za prenos govora.
   - Opsezi (300-2400)Hz i (300-2700)Hz primjenjuju se u vezama redukovanog kvaliteta.

2. SIGNAL MUZIKE
   - Propisana potrebna širina opsega za prenos muzičkog signala je 30-15000Hz.
   - Postoje sistemi čija je širina opsega 50Hz-10 000Hz, ali je u njima kvalitet prenosa nešto lošiji.

3. SIGNALI PODATAKA I TELEGRAFSKI SIGNALI
   - Spektar je povezan sa brzinom signaliziranja

4. TELEVIZIJSKI SIGNAL (SIGNAL POKRETNE SLIKE)
   - Opseg koji zauzima video signal je od 10Hz do 5MHz

Osnovne karakteristike digitalnog signala



Primjer digitalnog binarnog slučajnog signala

$$V = 2f_c$$

gdje je:

- V brzina signaliziranja (V=1/T) izražena u b/s, a
- fc granična učestanost idealnog sistema za prenos.

Brzina ***V*** je poznata kao **Nayquistova brzina signaliziranja**.

Primjer: Odrediti maksimalnu brzinu prenosa podataka linijom veze čija je širina propusnog opsega jednaka 1MHz.