



# Računarske komunikacije

Prof. dr Enis Kočan ([enisk@ucg.ac.me](mailto:enisk@ucg.ac.me))

*Saradnik:* Dr Slavica Tomović ([slavicat@ucg.ac.me](mailto: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

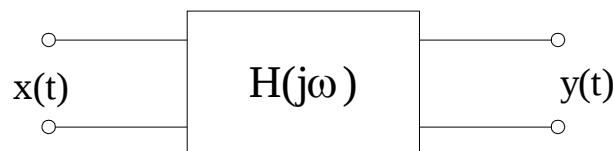
# Termin 3 - Sadržaj

---

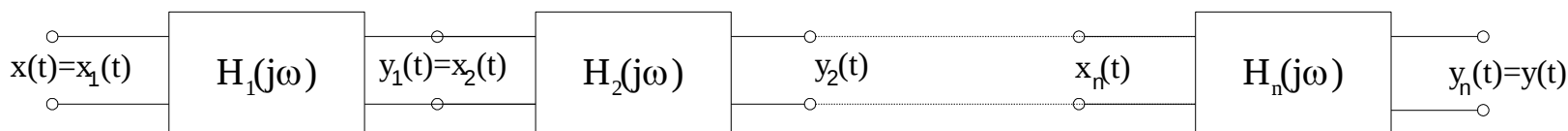
- **Pojam sistema za prenos signala**
- Idealni sistem prenosa
- Izobličenja u prenosu signala
- Analiza amplitudskih i faznih izobličenja metodom uparenih odjeka
- Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na oblik prenošenog signala

# Prenos signala kroz linearne sisteme

- Komunikacioni sistemi su sastavljeni od sklopova od kojih svaki pojedinačno predstavlja zasebnu funkcionalnu cjelinu.
- Za svaki sklop mogu se odrediti dva kraja koja predstavljaju ulaz i dva kraja koja predstavljaju izlaz iz sklopa. Dakle, svaki sklop se može smatrati četvorokrajnikom, odnosno **četvoropolom**.



- Niz ovakvih sklopova, čije su funkcije različite, a koji su vezani kaskadno, obrazuju **sistem za prenos**:



- Saglasno tome, kompletan sistem za prenos može da se ekvivalentira jednim četvoropolom.

- Takav četvoropol, koji predstavlja sistem za prenos, karakteriše **funkcija prenosa  $H(j\omega)$** . Pri tome:
  - Funkcija prenosa matematički modeluje promjene (amplitude i faze) koje nastaju pri prenosu signala kroz sistem.
  - Linearna kola ***ne izazivaju*** promjene učestanosti.
- Ako je signal na ulazu četvoropola  $x(t)$  i njegova Fourierova transformacija  $X(j\omega)$ , onda je Fourierova transformacija signala  $y(t)$  na izlazu četvoropola:

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

- Kako je funkcija prenosa kompleksna veličina, može se napisati u obliku:

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

$A(\omega)$  modeluje promjene amplitude ulaznog signala  
 $\chi(\omega)$  modeluje promjene faze ulaznog signala

- Ako ulazni i izlazni signal predstavimo u domenu učestanosti:

$$X(j\omega) = |X(j\omega)|e^{j\theta_x(\omega)}$$

$$Y(j\omega) = |Y(j\omega)|e^{j\theta_y(\omega)}$$

dobija se:

$$|Y(j\omega)| = A(\omega)|X(j\omega)|$$

$$\theta_y(\omega) = \theta_x(\omega) + \chi(\omega)$$

- Moduo  $A(\omega)$  funkcije prenosa opisuje modifikacije **spektralne gustine amplituda** prenošenog signala, dok argument  $\chi(\omega)$  funkcije prenosa opisuje promjene na nivou **faznih stavova** pojedinih komponenti prenošenog signala. Stoga se  $A(\omega)$  naziva **amplitudska**, a  $\chi(\omega)$  **fazna karakteristika** linearnog sistema.
- Za kaskadnu vezu više četvoropola, funkcija prenosa cijelog sistema se odredjuje kao:

$$H(j\omega) = H_1(j\omega)H_2(j\omega) \cdot \dots \cdot H_n(j\omega) = \prod_{i=1}^n H_i(j\omega)$$

$$A(\omega) = A_1(\omega)A_2(\omega) \cdot \dots \cdot A_n(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$$

$$\chi(\omega) = \chi_1(\omega) + \chi_2(\omega) + \dots + \chi_n(\omega) = \sum_{i=1}^n \chi_i(\omega)$$

- Amplitudska karakteristika  $A(\omega)$  cijelog sistema jednaka je **proizvodu** amplitudskih karakteristika pojedinih elemenata (sklopova)
- Fazna karakteristika  $\chi(\omega)$  cijelog sistema jednaka **sumi** faznih karakteristika pojedinih elemenata (sklopova)

# Termin 3 - Sadržaj

---

- Pojam sistema za prenos signala
- **Idealni sistem prenosa**
- Izobličenja u prenosu signala
- Analiza amplitudskih i faznih izobličenja metodom uparenih odjeka
- Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na oblik prenošenog signala

# Idealni sistem prenosa

---

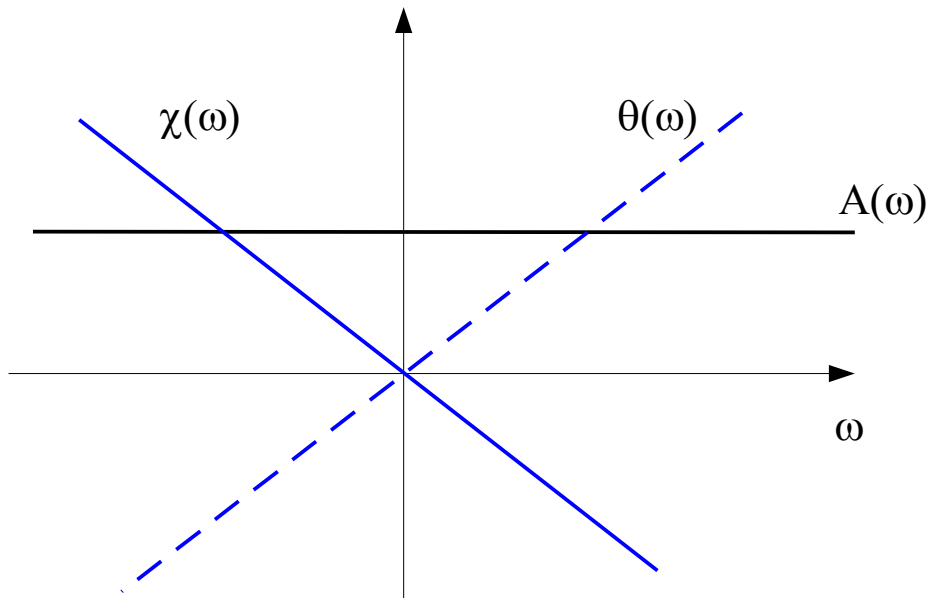
- **Idealni sistem prenosa** – sistem u kome je izlazni signal  $y(t)$  identičan ulaznom signalu  $x(t)$ .
- Generalnije, pod idealnim sistemom podrazumijeva se onaj sistem čiji je odziv oblika:

$$y(t) = Ax(t - t_0)$$

- Riječ je o sistemu koji unosi ***konstantno*** kašnjenje i modifikuje amplitudu u nekom ***konstantnom*** iznosu.
- Na taj način se postiže da preneseni signal ne bude izložen deformacijama koje bi dovele do toga da signal na izlazu sistema (sklopa) ne bude identičan ulaznom signalu.

# Idealni sistem prenosa

- Polazeći od  $y(t)=Ax(t-t_0)$ , dobija se funkcija prenosa  $H(j\omega)$  idealnog sistema za prenos.



Prenos će biti idealan kroz linearni sistem koji ima **amplitudsku karakteristiku koja ne zavisi od učestanosti**:

$$A(\omega)=A=\text{const.}$$

i **faznu karakteristiku koja je linearna funkcija učestanosti**:

$$\chi(\omega)=-\omega t_0$$

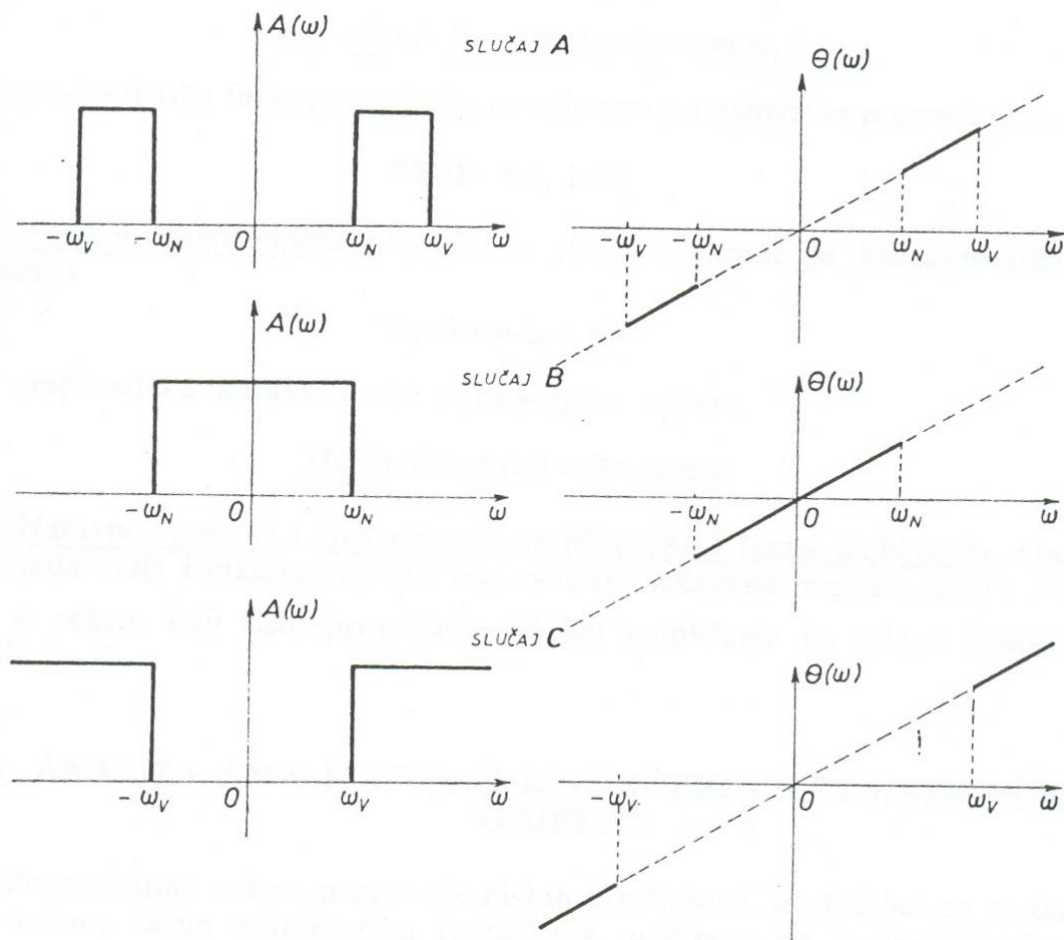
# Idealni sistem prenosa

---

- Pri tome, za  $A > 1$  sistem unosi ***pojačanje***, a za  $A < 1$  ***slabljenje***.
- Pri traženju uslova za idealan prenos nismo postavili nikakva ograničenja u pogledu širine spektra prenošenog signala  $x(t)$ . U tom slučaju, za prenos signala bez izobličenja, izvedeni uslovi moraju biti zadovoljeni u ***cijelom opsegu učestanosti*** ( $-\infty < \omega < \infty$ ).
- Medjutim, sistemi za prenos se realizuju kao sistemi ***ograničenog opsega*** učestanosti, tako da se govori o ***propusnom opsegu*** sistema za prenos ili ***širini kanala***.
- U takvim uslovima cijeli sistem se ponaša kao ***filtar***, tj. komponente signala određenih učestanosti koje se nalaze u njegovom propusnom opsegu propušta sa malim slabljenjem (ili ih u nekim slučajevima i pojačava), dok za ostale komponente van njegovog propusnog opsega unosi veliko slabljenje.

- Idealan sistem za prenos u propusnom opsegu ima karakteristike idealnog sistema, dok sve komponente ulaznog signala van tog opsega beskonačno slabi. Sisteme za prenos dijelimo u tri grupe:

1. **propusnike opsega učestanosti** (opseg je od  $\omega_N$  do  $\omega_V$ )
2. **propusnike niskih učestanosti** (opseg je od  $\omega_N=0$  do  $\omega_V$ )
3. **propusnike visokih učestanosti** (opseg je od  $\omega_N$  do  $\omega_V \rightarrow \infty$ )



*Slika: Amplitudska karakteristika i karakteristika faznog kašnjenja idealnog sistema za prenos:*

*A - propusnik opsega;*

*B - propusnik niskih učestanosti;*

*C - propusnik visokih učestanosti*

- Funkcija prenosa idealnog sistema za prenos (filtra) je:

$$H(j\omega) = \begin{cases} Ae^{-j(\omega t_0 \pm n\pi)} & \text{u propusnom opsegu} \\ 0 & \text{van propusnog opsega} \end{cases}$$

- Prelaz sa propusnog na nepropusni opseg treba da bude **trenutan** (amplitudska karakteristika sa A na 0), pa se javlja problem praktične realizacije ovakvog sistema.

### ✓ Zaključak:

- Linearni sistemi koji bi imali idealnu funkciju prenosa (kao na slikama) **ne mogu se fizički realizovati:**
- Ne mogu se postići **istovremeno oba uslova za idealan prenos**, pa se zbog toga javljaju izvjesna **izobličenja** signala.
- Iako se mogu samo teorijski analizirati, idealni sistemi prenosa imaju značaj za analizu realnih sistema. Ako se napravi sistem čija amplitudska karakteristika približno zadovoljava uslov idealnog prenosa, dodavanjem određenog sklopa može se korigovati fazna karakteristika da ukupno fazno kašnjenje sistema zadovolji uslov za prenos bez izobličenja (važi i obrnuto).

# Termin 3 - Sadržaj

---

- Pojam sistema za prenos signala
- Idealni sistem prenosa
- **Izobličenja u prenosu signala**
- Analiza amplitudskih i faznih izobličenja metodom uparenih odjeka
- Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na oblik prenošenog signala

# Izobličenja u prenosu signala

---

- Pri prenosu signala telekomunikacionim sistemom (ili sklopom) može doći do izobličenja zbog:
  1. odstupanja funkcije prenosa sistema od idealne
  2. nepoklapanja opsega signala i propusnog opsega sistema
  3. kombinacije prethodna dva slučaja.
- Sistem koji ima idealnu funkciju prenosa i čiji se propusni opseg poklapa sa opsegom signala na ulazu nije moguće realizovati. Drugim riječima, fizički nije moguće postići istovremeno oba uslova za idealan prenos.
- Odstupanja od uslova idealnog prenosa uvijek dovode do pojave ***izobličenja*** u signalu koji se prenosi.

# Linearna izobličenja

---

- Razlikuju se **tri vrste linearnih izobličenja**:

- Amplitudska izobličenja** – nastaju u linearnim sistemima u kojima amplitudska karakteristika odstupa od idealne (tj. zavisna je od učestanosti), dok karakteristika faznog kašnjenja ne odstupa od uslova za prenos bez izobličenja:

$$|H(j\omega)| = A(\omega) \neq \text{const}, \quad \theta(\omega) = \omega t_0 \pm n\pi$$

- Fazna izobličenja** - karakteristika faznog kašnjenja odstupa od idealne, dok amplitudska karakteristika zadovoljava uslov za prenos bez izobličenja:

$$|H(j\omega)| = A(\omega) = A = \text{const}, \quad \theta(\omega) \neq \omega t_0 \pm n\pi$$

- Kombinovana izobličenja** – i amplitudska karakteristika i karakteristika faznog kašnjenja odstupaju od idealne:

$$|H(j\omega)| = A(\omega) \neq \text{const}, \quad \theta(\omega) \neq \omega t_0 \pm n\pi$$

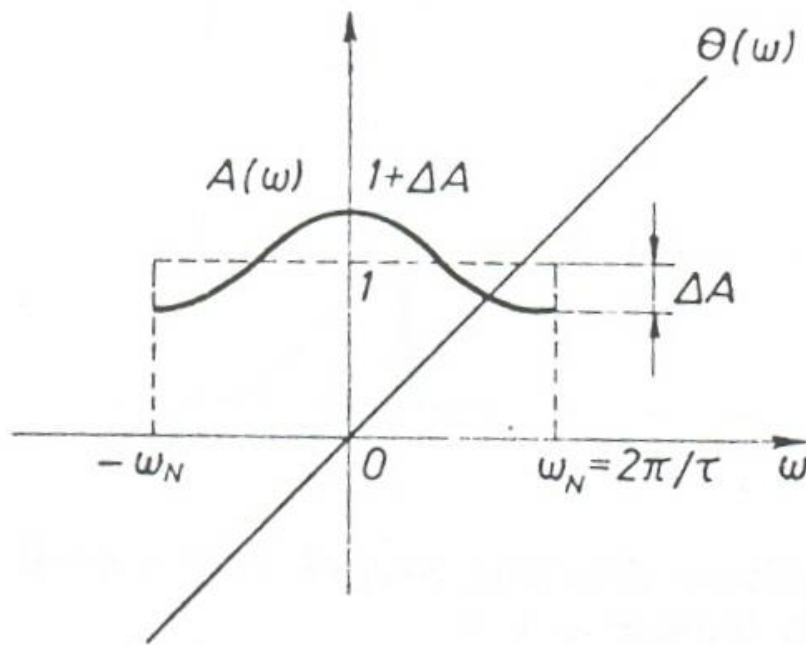
# Termin 3 - Sadržaj

---

- Pojam sistema za prenos signala
- Idealni sistem prenosa
- Izobličenja u prenosu signala
- **Analiza amplitudskih i faznih izobličenja metodom uparenih odjeka**
- Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na oblik prenošenog signala

# Analiza amplitudskih izobličenja

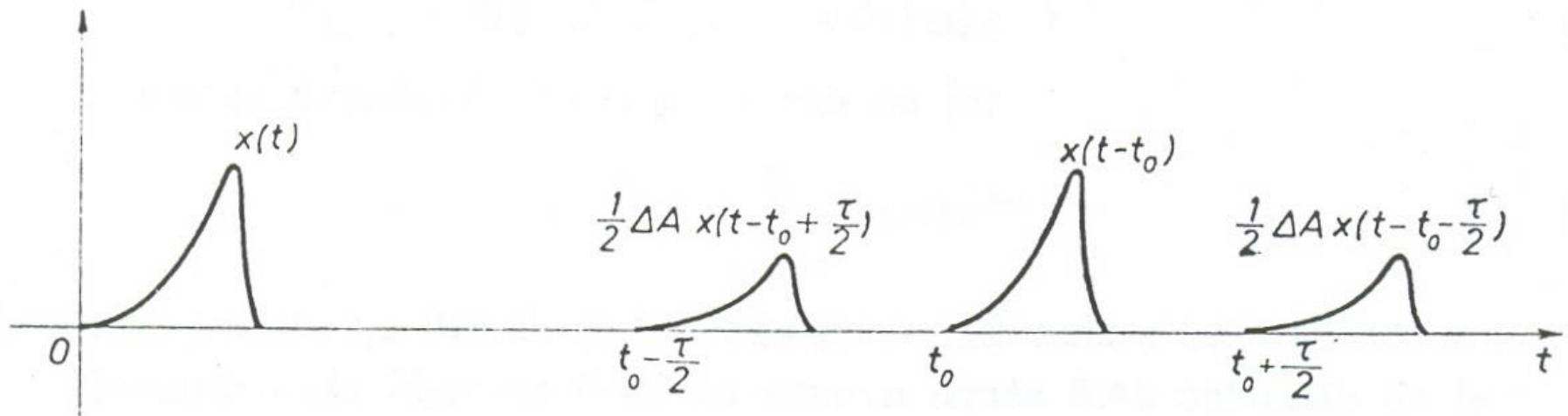
- Posmatrajmo sistem propusnik niskih učestanosti.
- Kako bi proučili uticaj samo **amplitudskih** izobličenja, neka amplitudska karakteristika odstupa od idealne, tj. zavisi od učestanosti, a karakteristika faznog kašnjenja je linearna, tj:



$$A(\omega) = \begin{cases} 1 + \Delta A \cos \frac{\tau}{2} \omega & \text{za } |\omega| < \frac{2\pi}{\tau} = \omega_N \\ 0 & \text{za } |\omega| > \frac{2\pi}{\tau} = \omega_N \end{cases}$$
$$\theta(\omega) = \omega t_0$$

- Amplitudska karakterisitika je uvijek **parna funkcija** učestanosti.

- Izlazni signal sastoji iz tri člana:
  - poslati signal koji u vremenu kasni za  $t_0$
  - drugi i treći član predstavljaju nove signale koji su se pojavili na izlazu iz sistema zbog amplitudskog izobličenja. Njihov talasni oblik je sličan originalnom, samo je amplituda pomnožena koeficijentom  $(1/2)\Delta A$ , a fazno su pomjereni za  $t_0 - \tau/2$  i  $t_0 + \tau/2$ . Javljaju se u paru, lijevo i desno oko prenošenog signala  $x(t-t_0)$ , pa se nazivaju **upareni odjeci**.



*Slika: Pojava uparenih odjeka nastalih uslijed amplitudskih izobličenja prenošenog signala  $x(t)$  u sistemu sa navedenom funkcijom prenosa*

- U prethodnoj analizi je pretpostavljen jedan specifičan oblik amplitudske karakteristike  $A(\omega)$ :

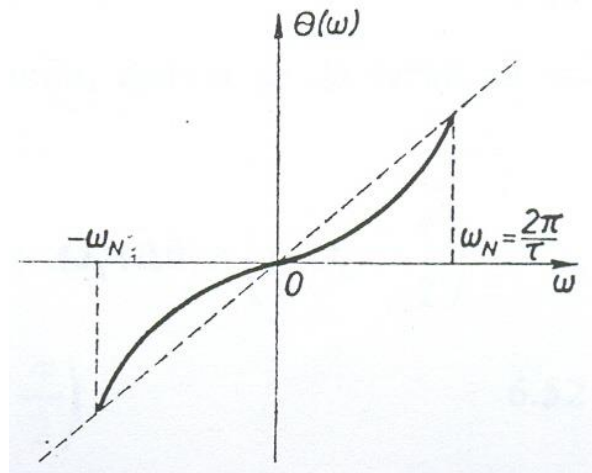
$$A(\omega) = \begin{cases} 1 + \Delta A \cos \frac{\tau}{2} \omega & \text{za } |\omega| < \frac{2\pi}{\tau} = \omega_N \\ 0 & \text{za } |\omega| > \frac{2\pi}{\tau} = \omega_N \end{cases}$$

$$\theta(\omega) = \omega t_0$$

- Kako je amplitudska karakteristika **parna** funkcija, bilo koji drugačiji oblik zavisnosti  $A$  od učestanosti može da se razvije u Fourierov red u kome će se javiti **kosinusni** članovi.
  - Kako je riječ o linearnim sistemima, važiće princip superpozicije, tj. svaki kosinusni član iz razvoja amplitudske karakteristike u red će izazvati pojavu po dva uparena odjeka lijevo i desno od signala  $x(t-t_0)$ .

# Analiza faznih izobličenja

- Posmatrajmo sistem propusnik niskih učestanosti čija amplitudska karakteristika ne zavisi od učestanosti, a karakteristika faznog kašnjenja nije linearna (kao na slici).

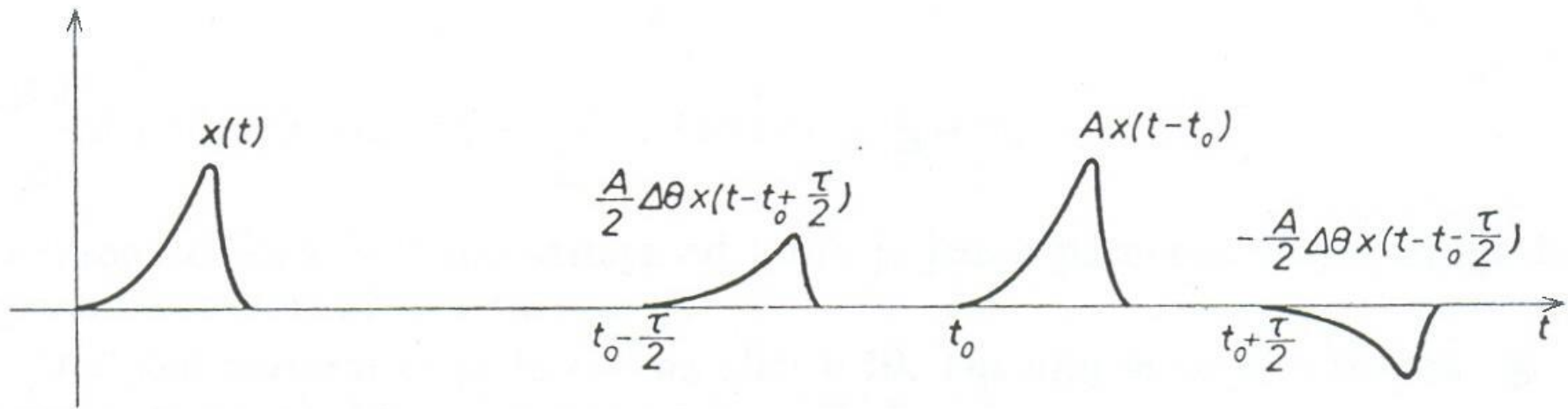


- Pošto je  $\theta(\omega)$  uvijek neparna funkcija od  $\omega$ , pretpostavićemo faznu karakteristiku sledećeg oblika:

$$\theta(\omega) = \omega t_0 - \Delta\theta \sin \frac{\tau}{2} \omega$$

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = A = \text{const.} \quad \text{za } |\omega| < \omega_N$$

- Uz učinjene pretpostavke dobija se odziv koji ima **tri komponente**:
- ✓ komponenta  $x(t-t_0)$  koja bi postojala u slučaju idealnog sistema prenosa
- ✓ dva člana – **upareni odjeci**, lijevo i desno od glavne komponente, pri čemu desni odjek ima fazni pomeraaj od  $\pi$ .



*Slika: Pojava uparenih odjeka nastalih usled faznih izobličenja prenošenog signala  $x(t)$  u sistemu za pretpostavljenu funkciju prenosa*

- Ovaj slučaj se može generalizovati i za bilo koju proizvoljnu funkciju faznog kašnjenja. Kako je ona uvijek **neparna**, može da se razvije u Fourierov red koji sadrži samo **sinusne** članove, i svaki od njih će dati par odjeka. Njihovom superpozicijom se dobija talasni oblik izobličenog izlaznog signala  $y(t)$ .

# Termin 3 - Sadržaj

---

- Pojam sistema za prenos signala
- Idealni sistem prenosa
- Izobličenja u prenosu signala
- Analiza amplitudskih i faznih izobličenja metodom uparenih odjeka
- **Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na oblik prenošenog signala**

# Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na talasni oblike prenošenog signala

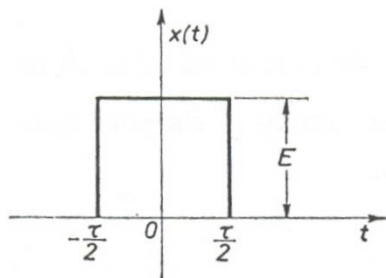
- Osnovna pretpostavka u razmatranjima idealnih sistema za prenos bila je da signal ima ograničen spektar i da se granice spektra signala ***poklapaju sa graničnim učestanostima sistema za prenos.***
- Razmatrajmo situaciju kada se signal prenosi kroz idealan linearni sistem pri čemu gore navedeni uslov nije ispunjen (odnosno propusni opseg sistema je manji od širine spektra signala).

## 1. PROPUSNIK NISKIH UČESTANOSTI

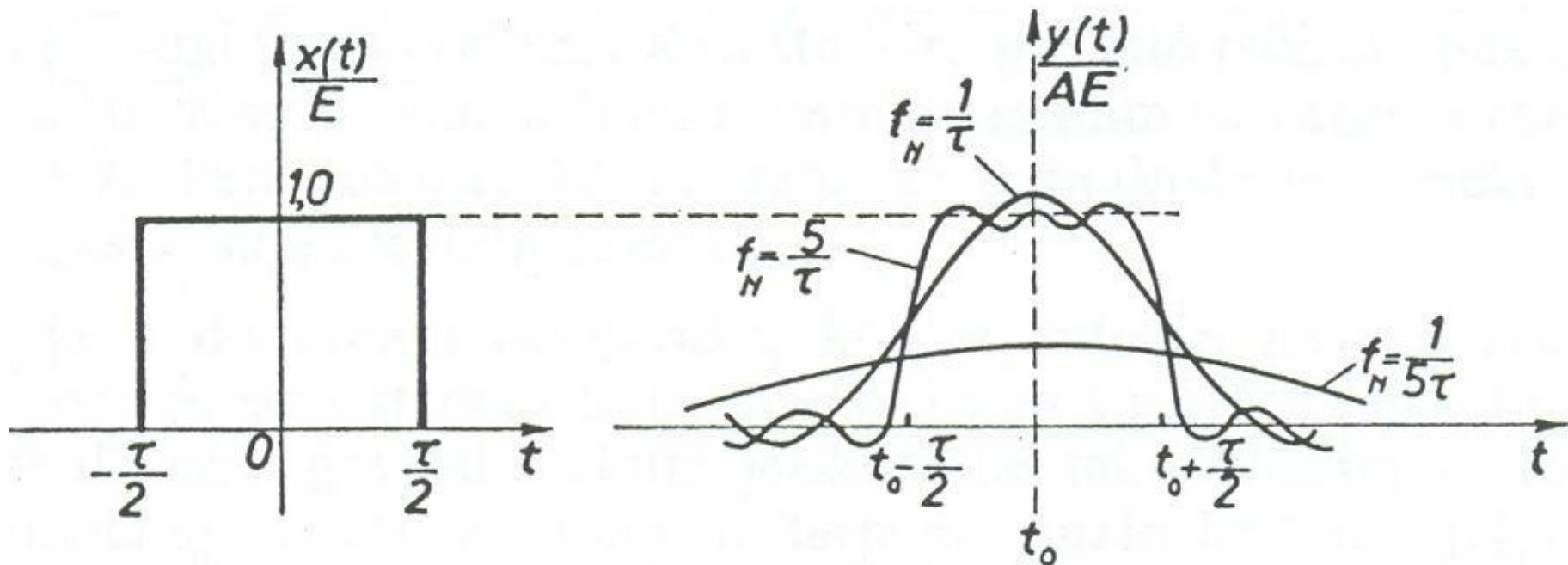
- Posmatrajmo idealan sistem za prenos koji propušta samo komponente niskih učestanosti. Njegova funkcija prenosa je data izrazom:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)}$$
$$A(\omega) = \begin{cases} A = \text{const} & |\omega| < \omega_N \\ 0 & |\omega| > \omega_N \end{cases}, \quad \theta(\omega) = \omega t_0$$

- Neka na ulaz sistema dolazi pravougaoni impuls:



- Za tri različite vrijednosti granične učestanosti  $f_N = \omega_N/2\pi$  ( $f_N \ll 1/\tau$ ,  $f_N = 1/\tau$  i  $f_N \gg 1/\tau$ ), talasni oblici izlaznog signala prikazani su na slici.



*Slika: Uticaj ograničenog propusnog opsega sistema propusnika niskih učestanosti na prenošeni pravougaoni impuls  $x(t)$  i njegov odziv  $y(t)$  za razne granične učestanosti*

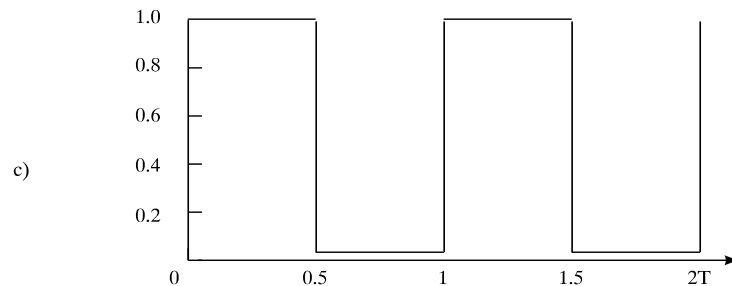
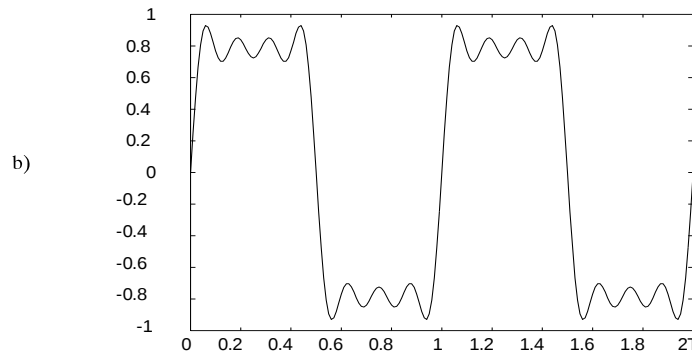
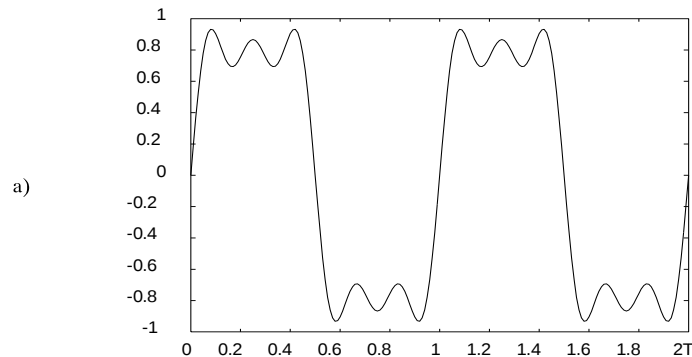
Na osnovu rezultata prikazanih na slici, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- U sva tri slučaja odziv ***kasni u vremenu*** za veličinu  $t_0$  određenu faznim kašnjenjem koje unosi sistem za prenos.
- U slučaju kada je širina propusnog opsega znatno manja od recipročne vrijednosti trajanja impulsa ( $f_N \ll 1/\tau$ ), dobijeni odziv ima veoma malo sličnosti sa poslatim impulsom (***izobličenje je vrlo veliko***).
- U slučaju kada je širina propusnog opsega jednaka recipročnoj vrijednosti trajanja impulsa ( $f_N = 1/\tau$ ), dobijeni odziv omogućava da se prepozna da je bio poslat impuls i, relativno uzevši, postoji značajna sličnost, iako je talasni oblik odziva daleko od toga da bude pravougaonik.
- U slučaju kada je širina propusnog opsega znatno veća od recipročne vrijednosti trajanja impulsa ( $f_N \gg 1/\tau$ ), dobijeni odziv ima značajno veći stepen sličnosti sa poslatim pravougaonim impulsom.
- Trenutak u kome se završava ulazni signal je  $t = \tau/2$ , dok je izlazni signal traje beskonačno  $t \rightarrow -\infty$ . Ovakav rezultat ukazuje na neku nepravilnost. ***Ne može da postoji odziv na izlazu, a da ne postoji pobudni signal na ulazu u sistem.***

### ✓ Zaključak:

Idealan sistem propusnik niskih učestanosti sa proizvoljno odabranom amplitudskom i faznom karakteristikom ***ne može se realizovati***.

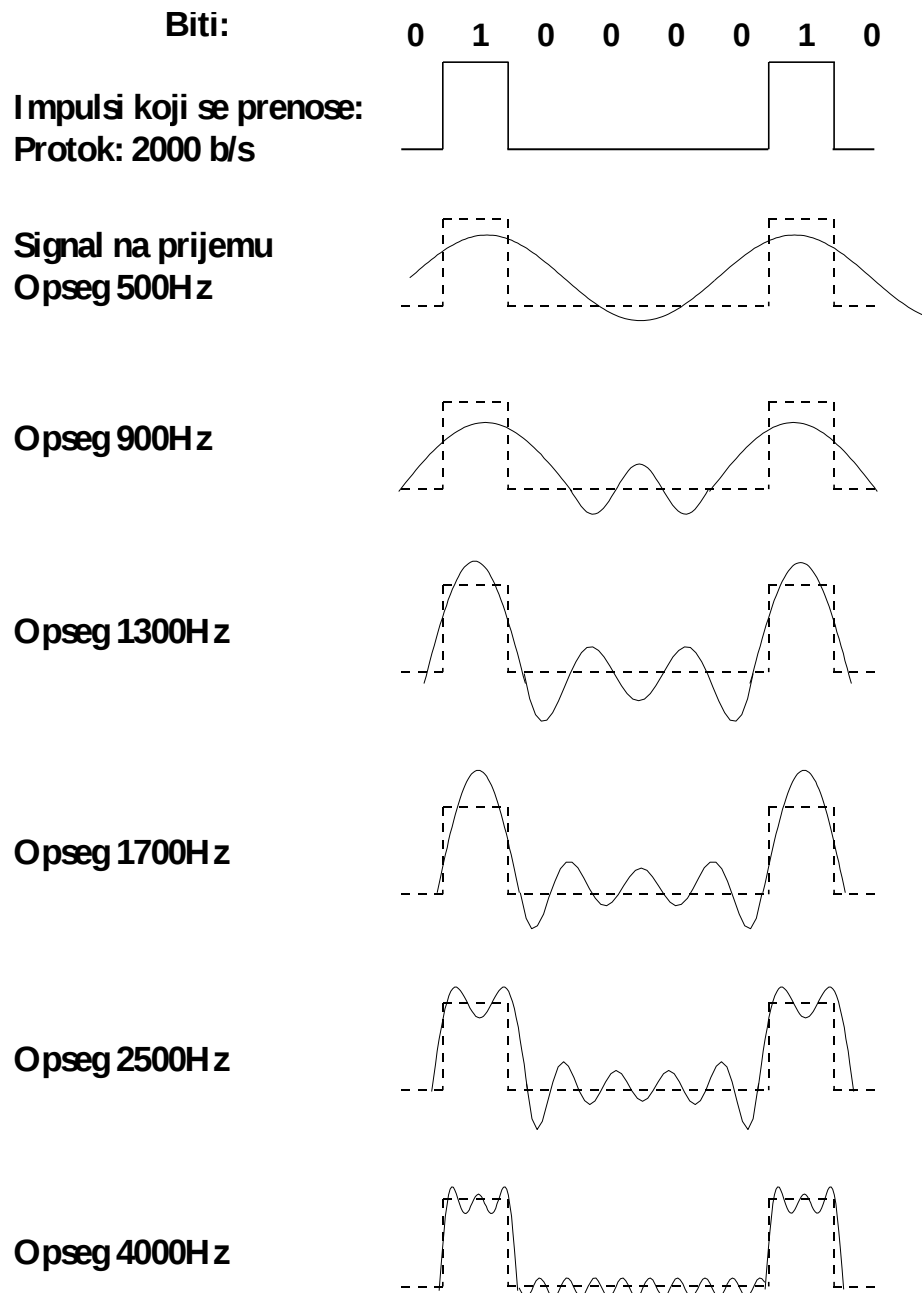
# Uticaj širine propusnog opsega idealnog sistema za prenos na talasni oblike prenošenog signala



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

<http://pages.jh.edu/~signals/fourier2/index.html>

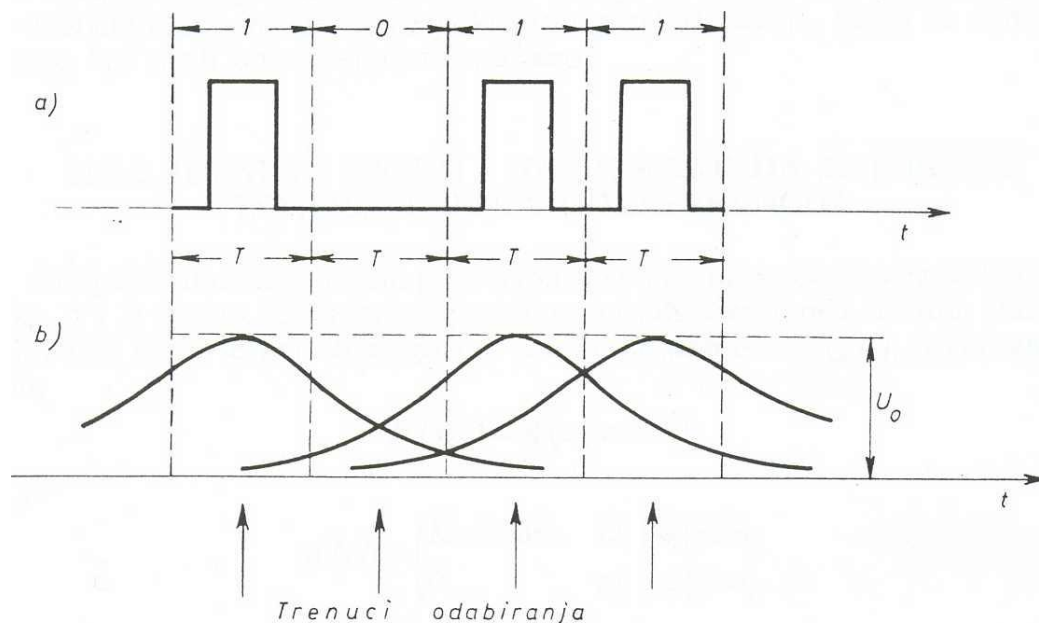
*Uticaj broja prenošenih harmonika na oblik signala*



*Uticaj širine propusnog opsega sistema za prenos na oblik primljenog signala*

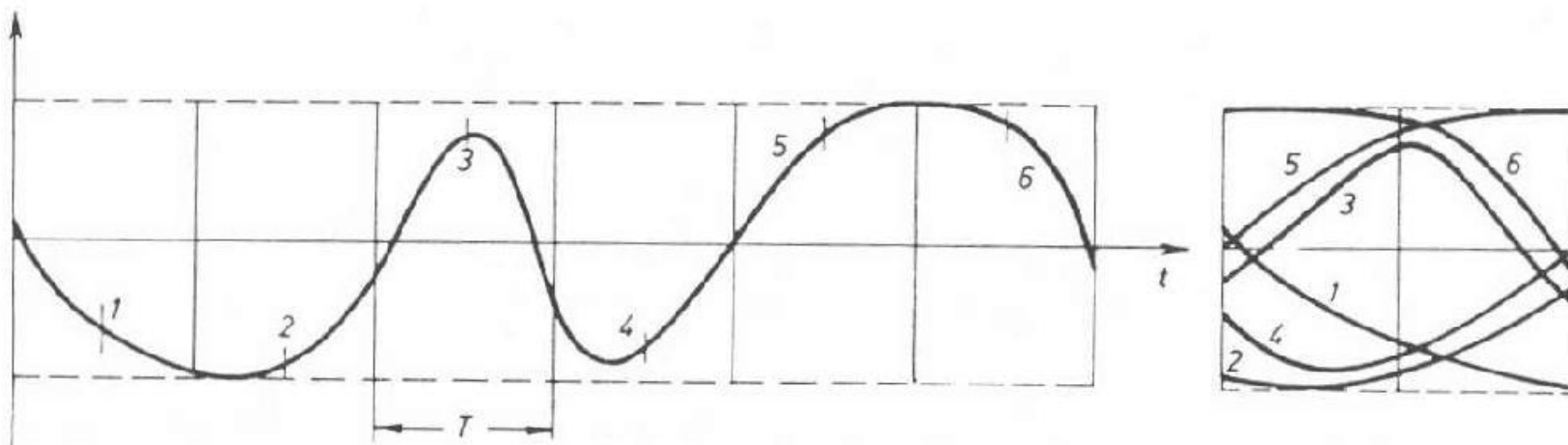
# Intersimbolska interferencija (ISI)

- U lokalnim računarskim mrežama digitalni signal se prenosi u osnovnom opsegu, u oblikupravougaonih impulsa.
- Zbog prisustva predajnog i prijemnog filtra, kao i medijuma za prenos, čitav sistem prenosa se ponaša kao propusnik niskih učestanosti.
  - Zato se na prijemu signal izobliči, proširi, a mogu se javiti i promjene amplitude.

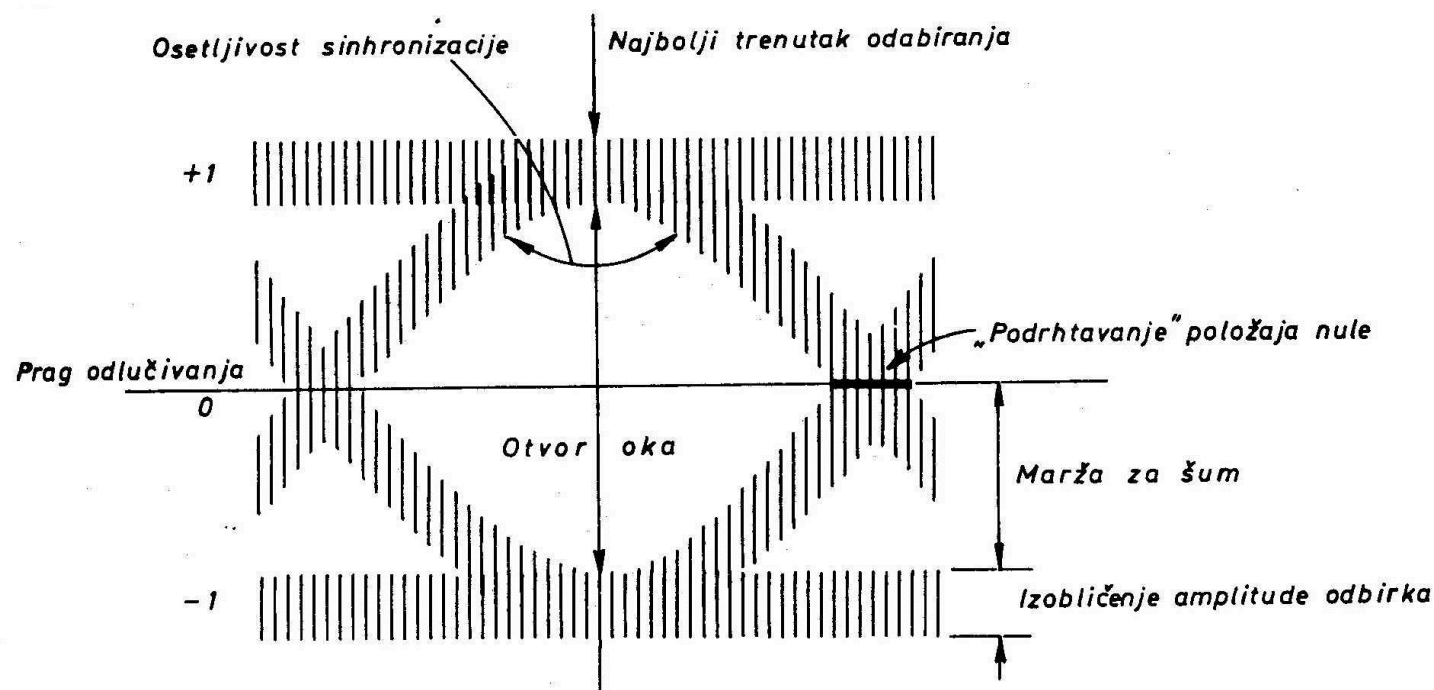


# Intersimbolska interferencija (ISI)

- Dakle, usled ograničenog propusnog opsega sistema dolazi do izobličenja poslatih pravougaonih impulsa i do pojave greške. **Ova pojava preklapanja impulsa koja ima uticaj na odlučivanje u prijemniku naziva se intersimbolska interferencija (ISI).**
- Za ocjenu nivoa ISI u nekom sistemu prenosa koristi se **dijagram oka**, koji se može dobiti snimanjem prijemnog digitalnog signala na osciloskopu, čija je vremenska baza podešena trajanju jednog signaolizacionog intervala  $T$



Ovi djelovi signala iz pojedinih signalizacionih intervala koji su preklopljeni jedan preko drugog daju dijagram oka. Naravno, ako se uzme dugačka povorka impulsa, mnoge linije ce se ispreplesti i obrazovaće se zadebljani tragovi. Oni su prikazani kao osjenčene površine na slici.



Otvor oka govori o tome kolika je intersimbolska interferencija: što je otvor oka veći to je interferencija manja. Isto tako, širina otvora daje indicaciju o tome koliki je vremenski interval u kome je moguće izabrati trenutak odabiranja. Drugim riječima, ta širina govori o osetljivosti sistema u pogledu tačnosti sinhronizacije: što je otvor širi, sistem je manje osetljiv na grešku u sinhronizaciji. Najbolji trenutak odabiranja je tamo gdje je otvor oka najveći.

# Intersimbolska interferencija (ISI)

---

- **ISI**, ili kako se nekad kaže **preslušavanje**, predstavlja ozbiljan problem u prenosu digitalnih signala.
  - Proširivanjem propusnog opsega sistema ovaj problem bi se mogao prevazići. Ali to znači rasipanje raspoloživog frekvencijskog opsega, a i znatno veći šum koji ulazi u prijemnik. Zbog toga se velika pažnja poklanja tehnikama za smanjivanje ili otklanjanje uticaja intersimbolske interferencije.
- Da bi se izbjegla ISI, potrebno je uskladiti brzinu prenosa digitačnog signala karateristikama medijuma za prenos.
- Signalizira se **Nyquist-ovom brzinom signaliziranja**. Za sistem prenosa opsega  $f_c$ , maksimalna brzina prenosa digitalnih signala je:

$$V_b = 1/T = 2 \cdot f_c$$

- U realnim sistemima prenosa, funkcija prenosa treba da zadovoljava Nyquist-ove kriterijume, da ne bi došlo do ISI.
- Pošto se karatkeristike kanala mogu mijenjati u vremenu, odnosno ipak se može javiti ISI, onda se na ulazu u prijemnik postavlja **transferzalni (Kalmanov) filter**, koji služi za otklanjanje ISI u konačnom broju tačaka.

# Korisni linkovi

---

- <http://www.jhu.edu/~signals/index.html>
- <http://www.jhu.edu/%7Esignals/ctftprops/indexCTFTprops.htm>
- <http://www.falstad.com/fourier/>