



Osnove digitalnih komunikacij

Data transmission fundamentals (31-44)



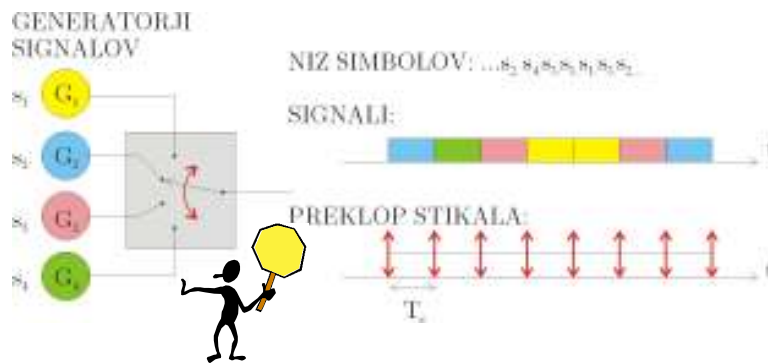
Informacijski pretok in simbolna hitrost

- **Informacijo** prenašamo v obliki zaporedja določenih signalnih oblik, ki jih imenujemo **simboli**
- **M** simbolov izberemo tako, da so med seboj čim bolj ločljivi !
- en simbol lahko nosi v povprečju največ **$b_s = \log_2(M)$** bitov informacije
- eden od starejših načinov digitalnih komunikacij:



Informacijski pretok in simbolna hitrost

- Vsak simbol predstavlja **električni signal**, ki ima omejen čas trajanja T_s
- **Simbolna hitrost f_s (baud-rate)** je število simbolov, ki jih prenašamo v eni sekundi: $f_s = 1/T_s$

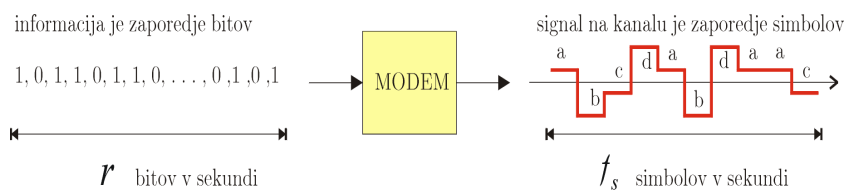


3

Informacijski pretok in simbolna hitrost

- **Informacijski pretok ali hitrost prenosa informacije** (information transfer rate) je produkt simbolne hitrosti s povprečnim številom bitov, ki jih prenaša en simbol.

$$r = b_s \cdot f_s$$



- Informacijski pretok merimo v bitih na sekundo: **bit/s**, kbit/s, Mbit/s

4

Informacijski pretok in simbolna hitrost

- Povprečna informacija, ki jo nosi en simbol je odvisna od kodirnega postopka:
 - Pri kodiranem prenosu vnaša **kanalni kodirnik** poleg informacijskih bitov še **redundanco**, ki nam omogoča odkrivanje napak, odpravljanje napak ali pa celo preprečevanje napak pri prenosu.
 - pri prenosu brez vnašanja redundance lahko prenašamo z vsakim simbolom največ **$b_s = \log_2(M)$** bitov.

prenosni sistem	f_s [simbol/s]	r [bit/s]	b_s [bit/simbol]
V.29 modem 16-QAM	2400	9600	4
V.32 modem 32-TCM	2400	9600	4
V.34 modem 960-TCM	3429	28800	8.4
ISDN modem 2B1Q	80 k	160 k	2

- ZGLEDI:

$$r = b_s \cdot f_s$$

5

Omejitve hitrosti prenosa informacije

- Kako povečamo hitrost prenosa informacije ? $r = b_s \cdot f_s$



$$r = r_1 \quad b_s = 1, f_s = f_1$$



$$r = 4 r_1 \quad b_s = 1, f_s = 4 f_1$$



$$r = 3 r_1 \quad b_s = 3, M = 8, f_s = f_1$$



$$r = 12 r_1 \quad b_s = 3, M = 8, f_s = 4 f_1$$

- Če povečamo simbolno hitrost, razširimo **spekter signala** !
- Če povečamo število nivojev **M**, se ob nespremenjeni moči signala zmanjša **distanca med simboli** !

6

Omejitve hitrosti prenosa informacije

- Informacijski pretok izražamo s produktom simbolne hitrosti in števila bitov na simbol, ki narašča z logaritmom števila vseh simbolov:

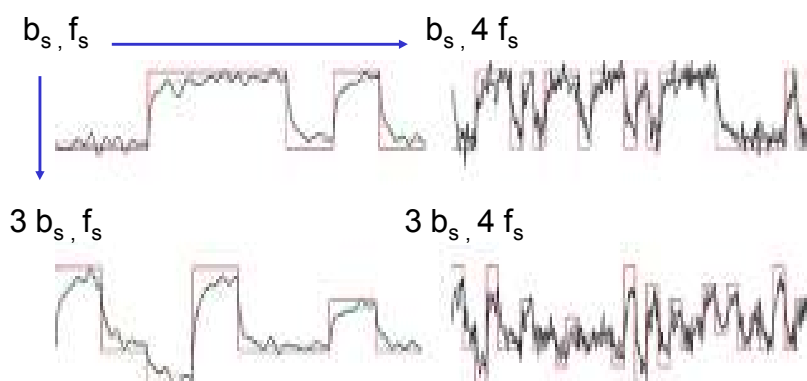
$$r = b_s \cdot f_s \quad b_s \leq \log_2 M$$

- Hitrost prenosa informacije bi bila neomejena, če lahko neomejeno povečujemo b_s ali f_s ? **DA!**
- Ali lahko neomejeno povečujemo vsaj enega od obeh faktorjev?
- NE!**
- Simbolna hitrost je omejena s pasovno širino kanala!**
- Število bitov na simbol je omejeno s šumom na kanalu!**
- Omejitve hitrosti prenosa informacije določa fizični prenosni kanal!**

7

Praktične omejitve hitrosti na fizičnem kanalu

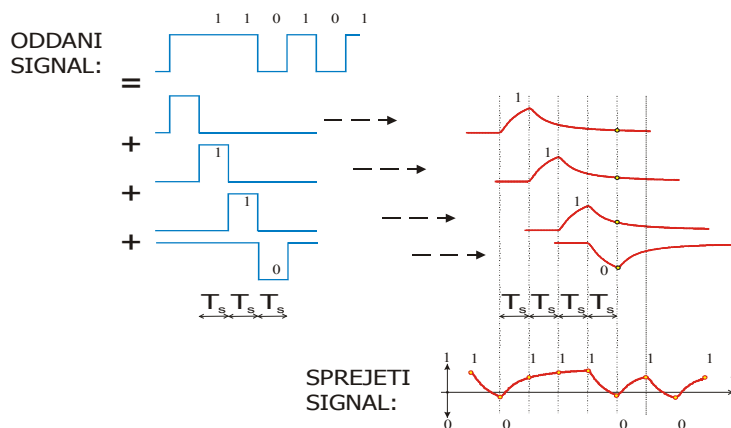
- Popačenje signala zaradi šuma in disperzije:



8

Omejitve s pasovno širino kanala ?

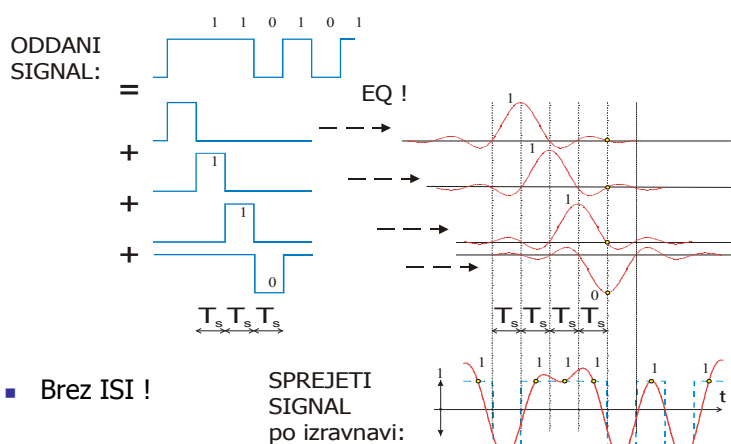
- Zaradi časovne disperzije se simboli prekrivajo med seboj:



9

Omejitve s pasovno širino kanala ?

- Kakšno prekrivanje simbolov lahko dopuščamo ?

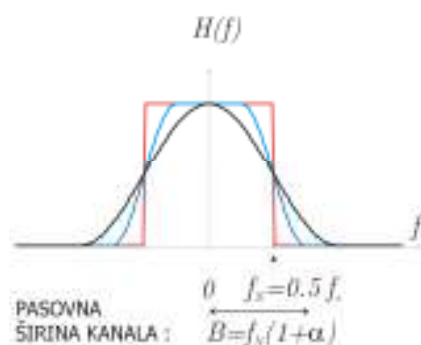


- Brez ISI !

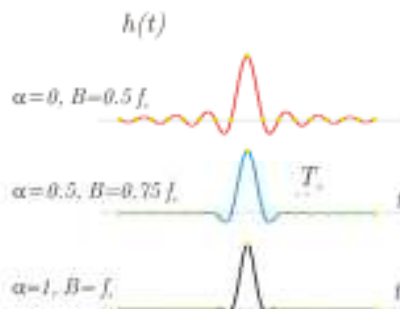
10

Omejitve s pasovno širino kanala

PREVAJALNA KARAKTERISTIKA KANALA



IMPULZNI ODZIV KANALA



- **Nyquistov teorem:** Po frekvenčno omejenem kanalu s pasovno širino B lahko brez interference med simboli prenašamo največ $f_s=2B$ simbolov v sekundi !

11

Omejitve s šumom: kapaciteta kanala

- **Kapaciteta komunikacijskega kanala določa maksimalno število bitov, ki jih lahko prenesemo po komunikacijskem kanalu brez napak.**
- **Shannonova formula za kapaciteto diskretnega Gaussovega kanala:**

$$C = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \right)$$

Gaussov šum

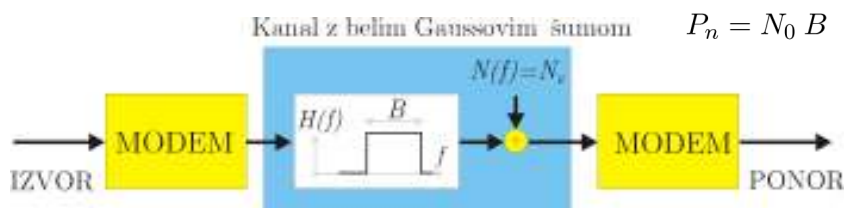


12

Omejitev s šumom in pasovno širino

- Shannonova formula za kapaciteto frekvenčno omejenega kanala z belim Gaussovimi šumom:

$$r_{max} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right)$$



- Povezava z Nyquistovim teoremom:

$$r_{max} = \max\{f_s b_s\} = 2B C$$

13

Omejitev s šumom in pasovno širino

Zgled:

- Koliko bitov v sekundi lahko teoretično prenašamo po frekvenčno omejenem kanalu z belim Gaussovimi šumom s podatki:
 - pasovna širina kanala je 4000 Hz
 - razmerje signal-šum na kanalu je konstantno 30dB, kar ustreza razmerju moči $P_s/P_n=1000$
- Odgovor: Največja hitrost prenosa po takšnem kanalu je 40.000 bitov v sekundi:
 - $r_{max}=4000 \log_2(1001)=39869 \text{ bit/s}$
- Komentar: Rezultat predstavlja **zgornjo teoretično mejo**, ki se ji lahko pri nizkih frekvencah zelo približamo z uporabo sodobnih kodirnih in modulacijskih postopkov.
- Praktični prenosni sistemi delujejo s sprejemljivo pogostostjo napak (BER).

$$r_{max} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right)$$

14



Bit/s, baud, Hz ?

ISDN naročniška zveza (osnovni dostop) omogoča prenos:

- dveh B kanalov s kapaciteto 64kbit/s,
- enega D kanala s prenosno kapaciteto 16kbit/s,
- dodatnih 16kbit/s potrebujemo za servisiranje fizičnega nivoja.
- ISDN modema, ki sta priključena vsak na svoji strani telefonske linije morata prenašati **$r=160 \text{ kbit/s}$** v obe smeri zveze.
- V ISDN modemu se uporablja štirinivojski prenos, kar pomeni, da vsak simbol prenaša dva bita informacije. Simbolna hitrost je zato polovico manjša od bitne hitrosti in znaša **$f_s=80 \text{ k baudov}$** .
- Prenos brez intersimbolne interference lahko poteka največ z dvema simboli na sekundo na 1 Hz pasovne širine. Za prenos s simbolno hitrostjo 80k baudov potrebujemo teoretično najmanj **$B_{\text{MIN}}=40 \text{ kHz}$** širok frekvenčni pas. Za lažjo implementacijo modemov praktično uporabljamo dvakrat širši frekvenčni pas: **$B=80 \text{ kHz}$** .

15



Fizični prenosni kanal

- Popačenja signalov na prenosnem kanalu
- Motnje na kanalu
- Matematični model kanala
- Pomen kapacitete fizičnega prenosnega kanala

16

Popačenja signalov na prenosnem kanalu

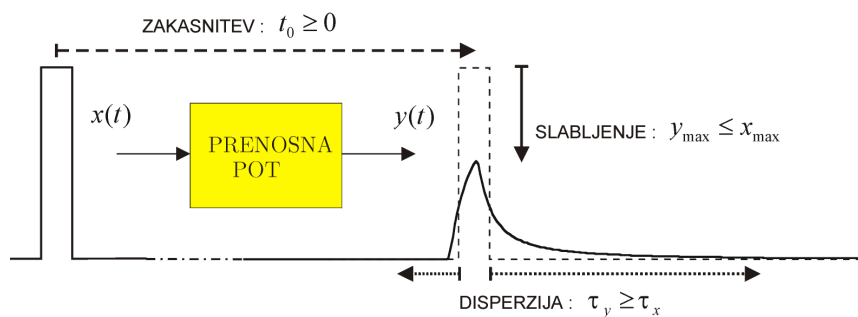


- Oblika signala se pri prehajanju čez fizični prenosni kanal spremeni. **Popačenja signala** so lahko linearna ali nelinearna.
- Nelinearnim popačenjem zaradi nelinearnih fizikalnih pojavov na prenosnem mediju se lahko v večini primerov izognemo.
- **Linearno popačenje signala** se kaže v frekvenčnem poteku prevajalne karakteristike kanala.
 - Oblika signala se spremeni zaradi frekvenčno odvisnega slabljenja na prenosni poti in spremljajoče disperzije.
 - Pojav razpršitve signala nastopi tudi pri razširjanju signala po več različno dolgih poteh.

17

Popačenje signala pri prenosu

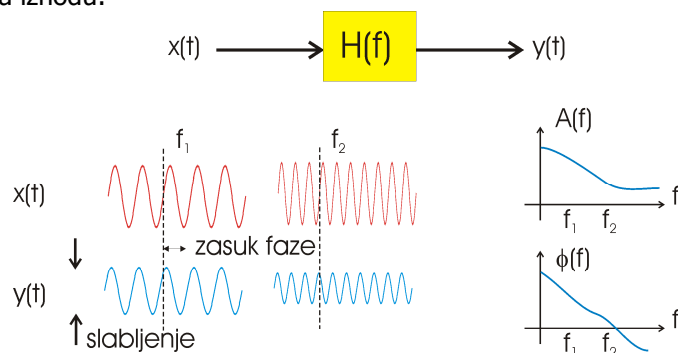
- Primer: popačitev impulza pri žičnem prenosu



18

Prenosne lastnosti kanala

- Prenosni kanal, ki ne vnaša nelinearnega popačenja lahko matematično opišemo z linearno **prevajalno funkcijo**.
- Za harmonične signale na vhodu kanala določa prevajalna funkcija kanala potek slabljenja in potek faznega zasuca signala na izhodu:



19

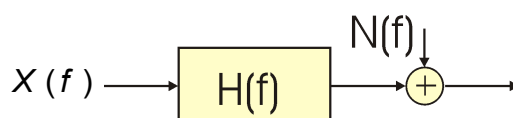
Motnje na kanalu

- Prenosni medij z izjemo optičnega vlakna ni izoliran od zunanjih motilnih vplivov. V radijskih komunikacijah so **motilni izvori** vsi oddajniki, ki delujejo v istem frekvenčnem območju. Pri žičnem prenosu predstavlja največjo motnjo presluh signalov iz sosednih vodov.
- Veliko število raznovrstnih električnih naprav povzroča sevanje v okolico in s tem predstavlja enega od izvorov šuma.
- Poleg tujih komunikacijskih izvorov je vedno prisoten tudi šum zaradi prostega gibanja elektronov, ki ga imenujemo tudi **termični šum**. Povprečna moč termičnega šuma narašča s temperaturo in pasovno širino: $N = k T B$
- Šum je po naravi **naključni signal**. Naključni signal opisujeta potek gostote močnostnega spektra in funkcija verjetnostne porazdelitve amplitude. V modelu za šum mnogokrat predpostavimo Gaussovo porazdelitev amplitude in enakomerno gostoto spektra moči (**beli Gaussov šum**).

20

Matematični model fizičnega kanala

- Preprosti model prenosnega kanala določata prevajalna funkcija prenosne poti in šumni izvor:



- Kvaliteto kanala izrazimo s potekom razmerja med gostoto moči signala in gostoto moči šuma na vhodu sprejemnika:

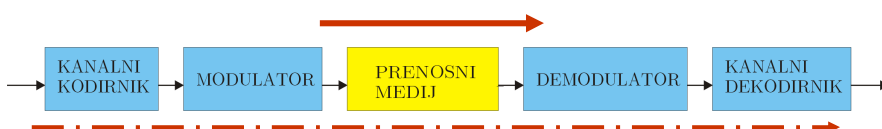
$$\frac{S(f)}{N(f)} = \frac{|X(f) \cdot H(f)|^2}{N(f)}$$

- SNR (Signal to Noise Ratio) je logaritemska mera razmerja moči signala in moči šuma

21

Pomen teoretične prenosne kapacitete fizičnega kanala

Teoretična prenosna kapaciteta določa zmogljivosti prenosnega medija!



Praktično dosegljiva hitrost prenosa informacije pri dopustni pogostosti napak (BER) je odvisna od stopnje tehnološke zahtevnosti opreme !

Učinkovitost izkoriščanja prenosne kapacitete medija je odvisna od prenosne opreme:

- Modulacija ?
- Kodiranje ?
- Način sodostopa ?



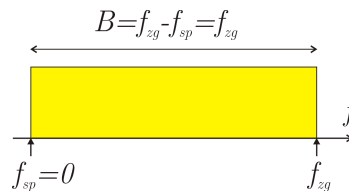
22

Digitalni prenos v osnovnem pasu

Baseband data transmission (49-74)

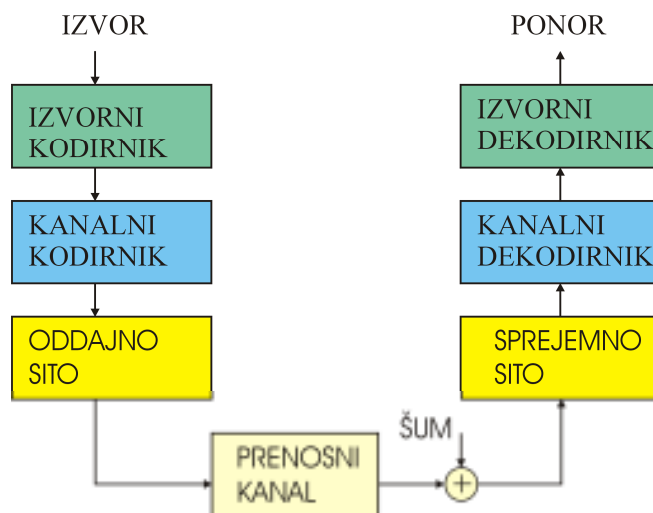
Digitalni prenos v osnovnem pasu

- Izraz **osnovni frekvenčni pas** izhaja iz analognih komunikacij . Osnovni pas je frekvenčno območje v katerem se nahaja večji del moči signala izvora.
- Pri prenosu v osnovnem pasu (baseband) uporabljamo frekvenčno področje od 0Hz naprej:



- Prenos signalov v osnovnem pasu uporabljamo v komunikacijah po kovinskih žičnih vodih kot sta na primer parica in koaksialni vod.
- Če prenosni medij ne omogoča prenosa v osnovnem pasu, moramo signale z modulacijo prestaviti v višjo frekvenčno lego. Takrat govorimo o prenosu v višji frekvenčni legi (passband).

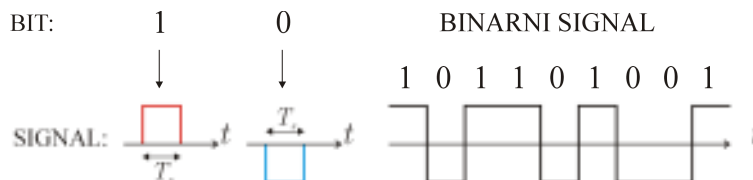
Model sistema za prenos v osnovnem pasu



25

Impulzno amplitudna modulacija

- Impulzno amplitudna modulacija **PAM** (Pulse Amplitude Modulation) se najpogosteje uporablja za digitalni prenos v osnovnem pasu.
- Informacijo zapišemo z amplitudo impulzov omejenega trajanja.
- Najpreprostejši je binarni prenos s pravokotnimi impulzi:



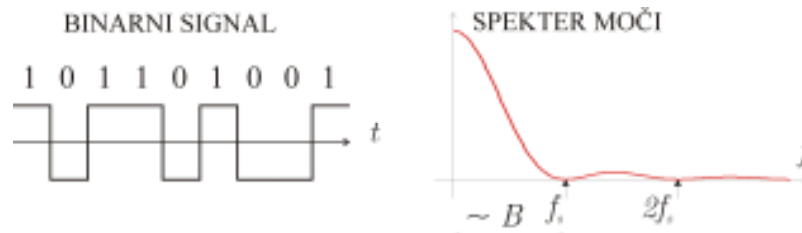
- Pri binarnem prenosu vsak simbol nosi en bit informacije, zato je hitrost prenosa informacije enaka simbolni hitrosti:

$$r = f_s$$

26

Spekter binarnega signala

- Zaradi pravokotnega oblikovanja impulzov potrebujemo razmeroma širok frekvenčni pas, približno do simbolne frekvence f_s :



- S pravokotno oblikovanimi binarnimi impulzi lahko po kanalu s pasovno širino B prenesemo približno B bitov v sekundi:
- Primer: Po kanalu s pasovno širino 100kHz lahko prenašamo samo 100kbit/s.

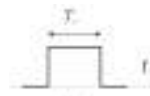
$$r \approx 1 B$$

27

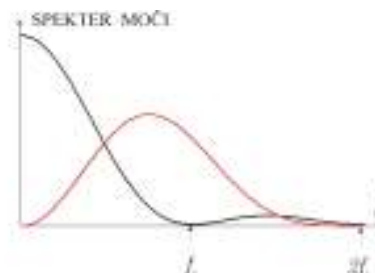
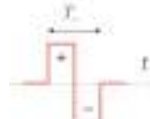
Dvoimpulzni prenos - Manchester koda

- Prenos v osnovnem pasu poteka mnogokrat brez prevajanja enosmerne komponente signala. Izločitev enosmerne komponente nastopa zaradi induktivnega ali pa kapacitivnega sklopa prenosnih naprav na žične vode.
- Posledica izločitve enosmerne komponente je popačitev signala, ki ima največji učinek pri dolgem zaporedju enakih znakov.
- Med množico načinov izločanja enosmerne komponente je zelo učinkovit princip izločanja DC na intervalu enega simbola. Posledica je dvakrat širši spekter:

BIPOLARNA KODA
(NRZ)



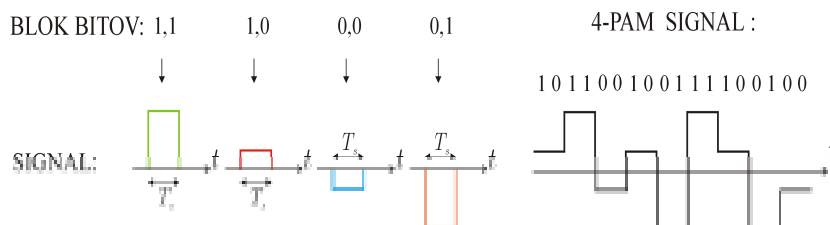
BIFAZNA KODA
(Manchester)



28

Impulzno amplitudna modulacija

- Več bitov v enakem času lahko prenesemo z več nivoji:



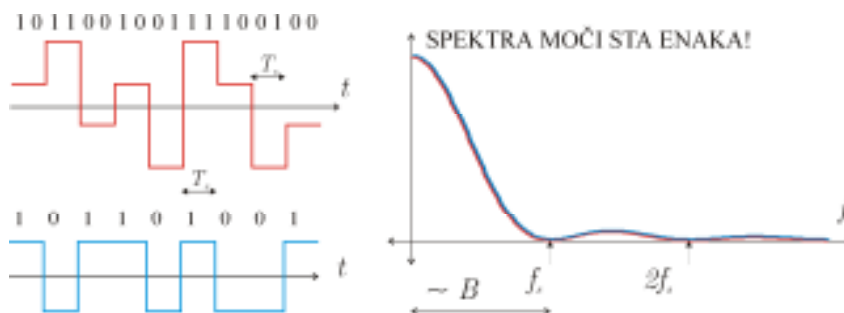
- Uporabimo **Grayevo kodiranje** simbolov: sosedni simboli se razlikujejo samo za en bit: BER=SER,
- Pri M-PAM prenosu vsak simbol nosi $\log_2(M)$ bitov informacije, zato je hitrost prenosa informacije enaka:

$$r = f_s \log_2 M$$

29

Spekter M-PAM signalov

- Sprememba števila nivojev ne vpliva na spekter signala:



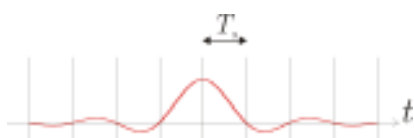
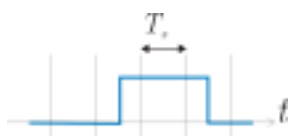
- S pravokotno oblikovanim M-PAM signalom lahko prenašamo po kanalu s pasovno širino B približno $B \log_2 M$ bitov v sekundi:

$$r \approx B \log_2 M$$

30

Kontrola širine spektra

- Širino frekvenčnega spektra signala lahko zmanjšamo, če impulze podaljšamo ali pa jih oblikujemo:

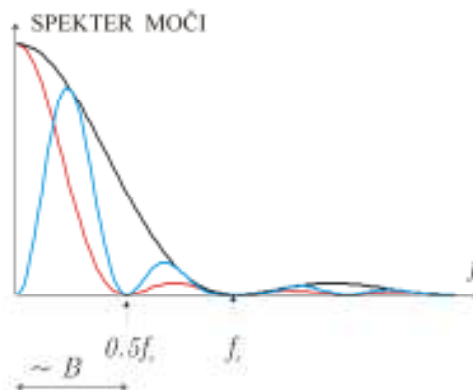
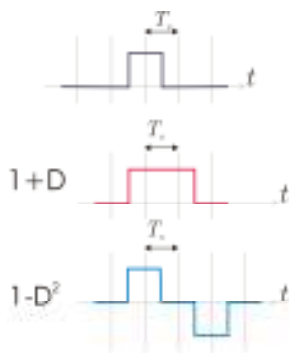


- Če širino impulza podvojimo, se širina spektra zmanjša na polovico! Zaradi prekrivanja dveh sosednih impulzov dobimo **trinivojski** signal (duo-binary). Zoževanje spektra signala je na račun povečanja števila nivojev!
- Podaljševanje impulza ne vnaša interference med simboli, če je v trenutkih vzorčenja sosednih simbolov vrednost signala nič!

31

Podaljševanje impulzov

- Podaljševanje impulzov (**partial response signalling**) z namernim kontroliranim vnašanjem interference med simboli imenujemo tudi korelativno kodiranje. Najbolj pogosti obliki podaljševanja pravokotnega impulza sta: duo-binary in modificirani duo-binary:

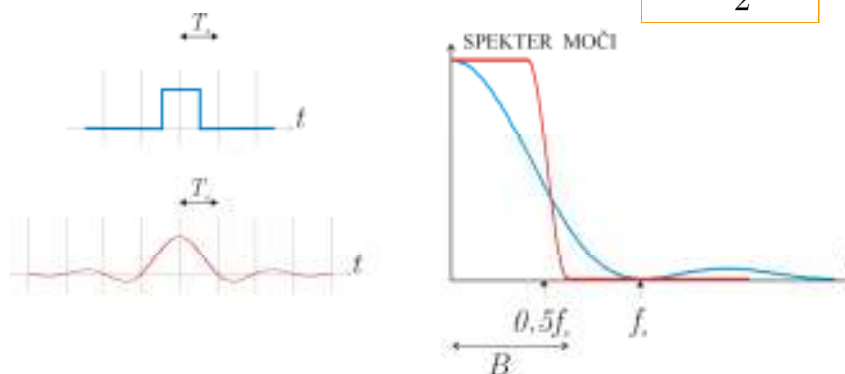


32

Oblikovanje impulzov

- Oblikovanje impulzov, ki ne vnaša intersimbolne interference lahko zmanjša potrebno pasovno širino do Nyquistove frekvence. Širina spektra signala je najmanj polovica simbolne frekvence:

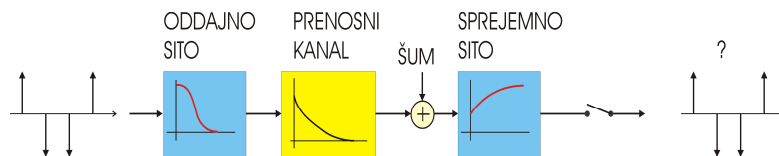
$$B > \frac{1}{2} f_s$$



33

Izravnava prenosne karakteristike kanala

- Na prenosnem kanalu nastopi popačenje signala zaradi neravne prenosne karakteristike in zaradi šuma, ki se prišteva k signalu.
- Izravnavo popačene prenosne karakteristike kanala izvaja sito v sprejemniku, ki ga imenujemo **izravnalnik** (equalizer).



- Optimalnega sita za izravnavo ni mogoče vnaprej določiti, zato se uporablja adaptivni izravnalnik.
- Načelni princip delovanja: **izravnalnik v svoji optimalni nastavitvi minimizira intersimbolno interferenco in šum v sprejemniku.**

34