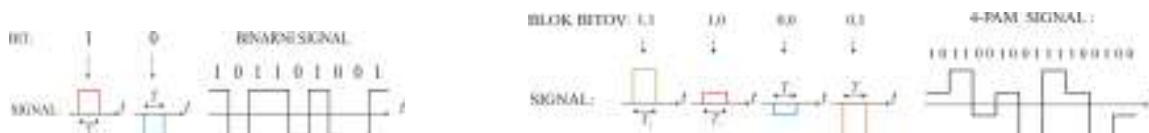


II. DIGITALNI PRENOS V OSNOVNEM PASU

Osnovni frekvenčni pas in spekter PAM signala

Najbolj pogosta oblika digitalnega signala je binarni signal. Informacija je kodirana kot zaporedje impulzov različnih amplitud (unipolarno) ali pa različnih polaritet (bipolarno). Spodnja slika levo ponazarja primer binarnega signala, kjer sta signalni obliki pravokotna impulza nasprotnih polaritet.

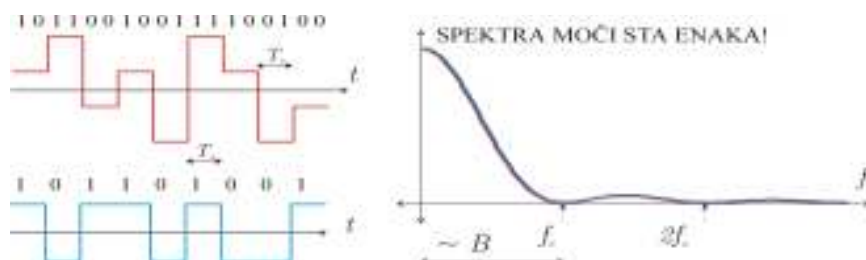


Impulzna komunikacija lahko poteka tudi z večjim številom simbolov M-PAM (angl: Pulse Amplitude Modulation), kot ponazarja desna stran slike.

Potek močnostnega spektra M-PAM signala je odvisen od oblike impulzov $p(t)$ in od trajanja impulzov T_s , ni pa odvisen od števila simbolov M. Potek gostote močnostnega spektra PAM signala podaja enačba:

$$S(\omega) = \frac{\sigma_x^2}{T_s} \cdot |P(\omega)|^2$$

Spodnji graf podaja potek gostote močnostnega spektra PAM-2 in PAM-4 signala, ki imata enako moč. S povečanjem števila nivojev moramo zmanjšati distanco med nivoji, s tem pa se poveča verjetnost napak zaradi šuma.

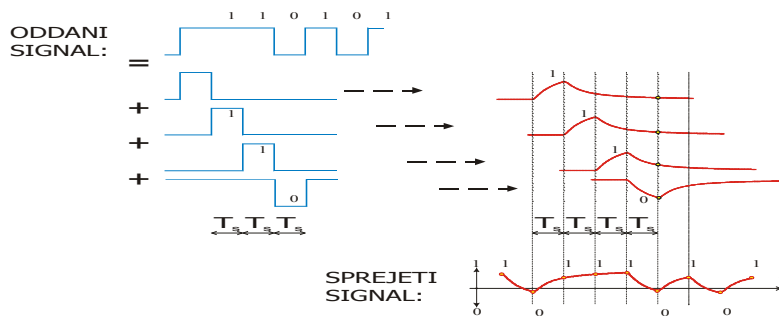


Moč signala ponazarja ploščina med krivuljo in frekvenčno osjo, pretežni delež moči pa se nahaja v frekvenčnem območju od $f=0$ do simbolne frekvence f_s . Navzgor omejeno frekvenčno območje imenujemo **osnovni pas digitalnega signala** (ang.: **baseband**).

Disperzija in intersimbolna interferenca

Signal oddajnika je nosilec informacije v obliki zaporedja časovno omejenih impulzov. Po prenosu po komunikacijskem kanalu se signalne oblike popačijo, poleg **slabljenja** impulzov nastopi tudi razpršitev v času ali **disperzija**. Disperzija moti pravilno prepoznavo simbolov v sprejemniku, saj se odzivi na

oddano zaporedje impulzov med seboj prekrivajo v času. Tako nastalo motnjo imenujemo **intersimbolna interferenca**. Učinek disperzije impulzov ponazarja slika:



Učinek disperzije je dobro viden po zaporedju treh impulzov z enako polariteto, ki mu sledi nasprotni simbol. Interferenca med simboli povzroči napako pri detekciji simbola kadar je vsota vzorcev motilnih signalov preteklih in prihodnih simbolov večja od vzorca signala detektiranega simbola.

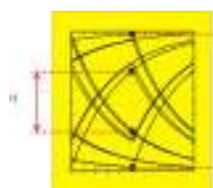
Velikost intersimbolne interference lahko pri bipolarni kodi ocenimo direktno iz časovnega poteka odziva kanala na en simbol, kot ponazarja spodnja slika:



Detekcija sprejetega simbola temelji na oceni polaritete enega vzorca sprejetega signala, smiselno je, da impulz vzorčimo ob nastopu maksimalne vrednosti $y[0]=y(t_0)$. Predhodni vzorci signala $y[-n]$ in vzorci ki sledijo $y[n]$ motijo detekcijo preteklih in naslednjih simbolov. Za oceno velikosti maksimalne intersimbolne interference uporabimo skalarno mero ISI:

$$ISI = \frac{\sum_{n \neq 0} |y(t_0 + nT)|}{|y(t_0)|}$$

Kritična mejna vrednost parametra ISI je 1. Pri vrednosti $ISI > 1$ nastopijo napake v detekciji simbolov že samo zaradi intersimbolne interference. Tudi nižja vrednost ISI vpliva na povečanje števila napak na šumnem kanalu. Intersimbolno interferenco je mogoče izmeriti na osciloskopu. Na vhod priključimo signal pred vzorčevalnikom in za proženje časovne baze uporabimo signal takta simbolne frekvence. Na ekranu osciloskopa se prikaže periodični vzorec, ki po obliki spominja na oko, zato ga imenujemo tudi **diagram odprtine očesa** ali očesni diagram. Število period omejimo s primerno nastavitvijo časovne baze in iz diagrama lahko odčitamo notranjo in zunanjo odprtino očesa in izračunamo ISI, kot prikazuje spodnja slika:

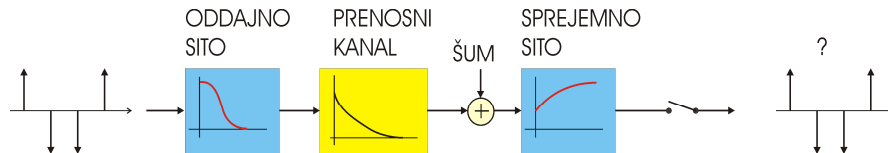


$$ISI = \frac{A - a}{A + a}$$

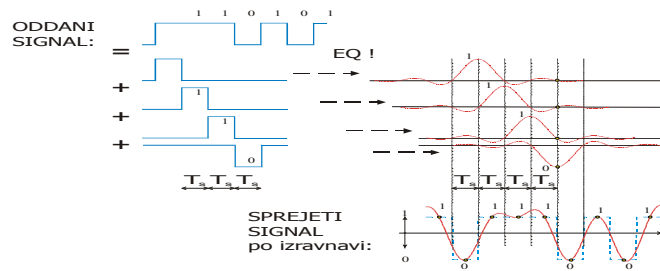
Iz diagrama odprtine očesa lahko odčitamo vrednosti ISI med 0 in 1.

Prenos brez ISI, Nyquistov kriterij

Intersimbolno interferenco lahko odpravimo s primerno izbiro sita v oddajniku in sita v sprejemniku. Model prenosnega sistema podaja spodnja slika: oddajno sito določa obliko impulzov, ki potujejo po prenosnem komunikacijskem kanalu. Sito v sprejemniku omejuje šum in hkrati tudi vpliva na obliko impulzov pred vzorčenjem. Sprejemno sito mora v svoji optimalni nastavitvi minimizirati moč šuma in intersimbolno interferenco.



Pogoj za prenos brez intersimbolne interference definira skupni potek sistemske funkcije oddajnega sita, kanala in sprejemnega sita: $h(t) = h_{os}(t) h_k(t) h_{ss}(t)$. Primer skupne sistemske funkcije $h(t)$, ki ne povzroči intersimbolne interferenice podaja spodnja slika:



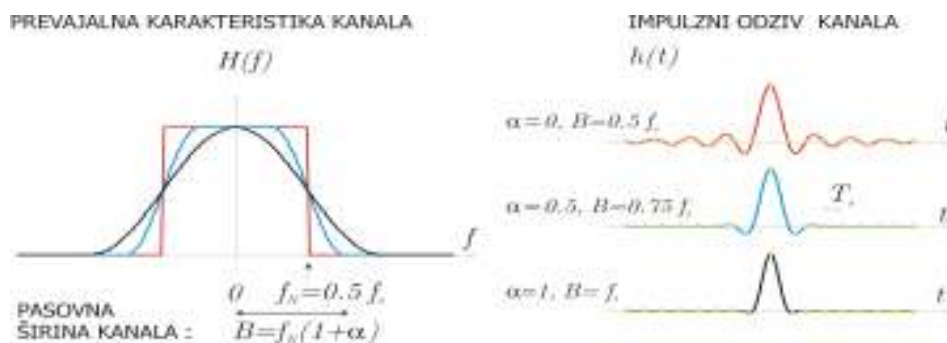
Oddani signal podaja leva stran slike: naključno zaporedje simbolov je superpozicija različno uteženih in zakasnenih impulzov, ki jim oddajno sito definira obliko in s tem tudi spekter signala. Oddani impulzi niso nujno pravokotne oblike, kot v danem primeru. Sprejemno sito je prilagojeno kanalu in oddajnemu situ tako, da imajo sprejeti impulzi pred vzorčevalnikom časovni potek $h(t)$, kot ga ponazarja desna stran slike. Če signal v sprejemniku vzorčimo s pravilno fazo, so vzorci sprejetega signala brez interferenice. Impulzne oblike, ki ne povzročajo intersimbolne interferenice imenujemo **Nyquistovi impulzi**:

$$h(t_0 + n \cdot T_s) = \begin{cases} A, & \text{za } n = 0 \\ 0, & \text{za } n \neq 0 \end{cases}$$

Pogoj imenujemo tudi Nyquistov kriterij za prenos brez intersimbolne interferenice. Pogoj lahko izrazimo tudi v frekvenčnem prostoru. Skupna prevajalna funkcija oddajnega sita, prenosnega kanala in sprejemnega sita $H(\omega) = H_{os}(\omega) H_k(\omega) H_{ss}(\omega)$ mora po vzorčenju izpolnjevati pogoj:

$$\frac{1}{T_s} \sum_k H(\omega - k \cdot \omega_s) = A$$

V načrtovanju sistemov za prenos brez ISI se pogosto uporablja družino funkcij dvignjenega kosinusa (angl: RC = Raised Cosine). Frekvenčni potek iz prepusta v zaporo ima obliko kosinusne funkcije, kot ponazarja leva slika za različne vrednosti parametra α :



Najožji frekvenčni pas zavzema rdeče obarvani potek za vrednost $\alpha=1$, kar je karakteristika idealnega nizkega sira z značilno mejno frekvenco $f_{zg}=0.5 f_s$. Najožji frekvenčni pas po katerem lahko prenašamo f_s simbolov v sekundi brez intersimbolne interference imenujemo **Nyquistova frekvenca**:

$$f_N = \frac{f_s}{2}$$

Primer:

- Za prenos $f_s=10^6$ simbolov v sekundi potrebujemo najmanj $B=2\text{MHz}$ širok frekvenčni pas.
- Po frekvenčno omejenem kanalu z mejno frekvenco 100kHz lahko prenašamo največ 200.000 simbolov v sekundi.

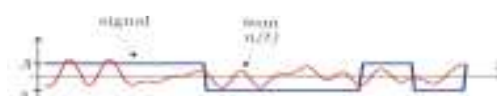
Šum na kanalu

V model prenosnega kanala je potrebno vključiti tudi motilne izvore, ki povzročajo šum. V naravi je šum mnogokrat vsota množice statistično neodvisnih signalov. Pri velikem številu nekoreliranih izvorov šuma ima **amplitudna verjetnostna porazdelitev šuma** $p_n(n)$ Gaussov potek s srednjo vrednostjo nič in varianco σ_n^2 , zato takšen signal imenujemo Gaussov šum:

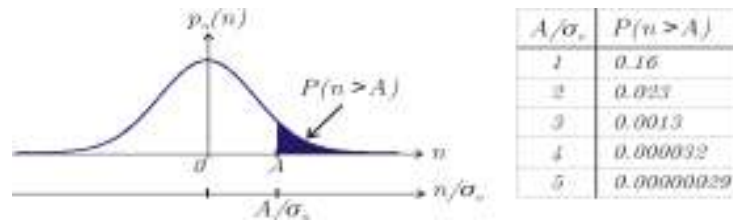
$$p_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \cdot e^{-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}}$$

Frekvenčni spekter šuma je podan s potekom gostote močnostnega spektra $N(\omega)$. Beli Gaussov šum ima raven potek gostote spektra $N(\omega)=N_0$. Poleg belega šuma poznamo tudi različne modele obarvanega šuma z različno definiranimi poteki spektralne gostote $N(\omega)$.

Vpliv šuma na pogostost napak



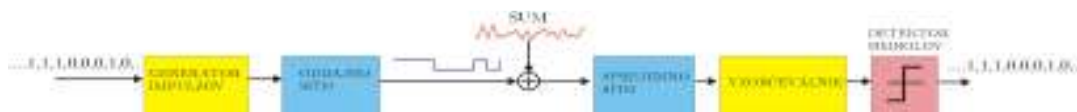
Napaka nastopi, če je vzorec šuma večji od vzorca signala. Če ima šum Gaussovo verjetnostno porazdelitev, lahko verjetnost dogodka $P(n>A)$ izrazimo s pomočjo verjetnostnega integrala, katere vrednost predstavlja potemnjena ploščina pod krivuljo:



Verjetnosti dogodka, da je vzorec šuma večji od pragovne vrednosti A je odvisna od moči šuma $P_n = \sigma_n^2$. Tabela na desni strani podaja nekaj orientacijskih vrednosti za različna razmerja A/σ_n .

Eksperimentalni model prenosnega sistema

V laboratoriju sestavimo model prenosnega sistema, kot ponazarja slika:



Podatkovni signal (0,1) vodimo na generator impulzov (+A, -A) in oddajno sito, ki oddaja zaporedje pravokotnih impulzov z amplitudo +A in -A in širino trajanja T_s . Uporabimo model kanala z belim Gausovim šumom AWGN (angl. Additive White Gaussian Noise). Sprejemno sito omejuje moč šuma pred vzorčenjem z simbolno frekvenco f_s .

V laboratorijskem eksperimentu uporabimo za sprejemno sito kar nizko sito z nastavljivo mejno frekvenco f_{zg} . Z nastavitvijo mejne frekvence različno vplivamo na moč šuma in na velikost ISI:

- moč šuma linearno narašča z mejno frekvenco sita,
- velikost ISI začne ob strmo naraščati ob zmanjšanju mejne frekvence sita v območju med $f_{zg} = f_s$ in $f_{zg} = 0.5 f_s$,

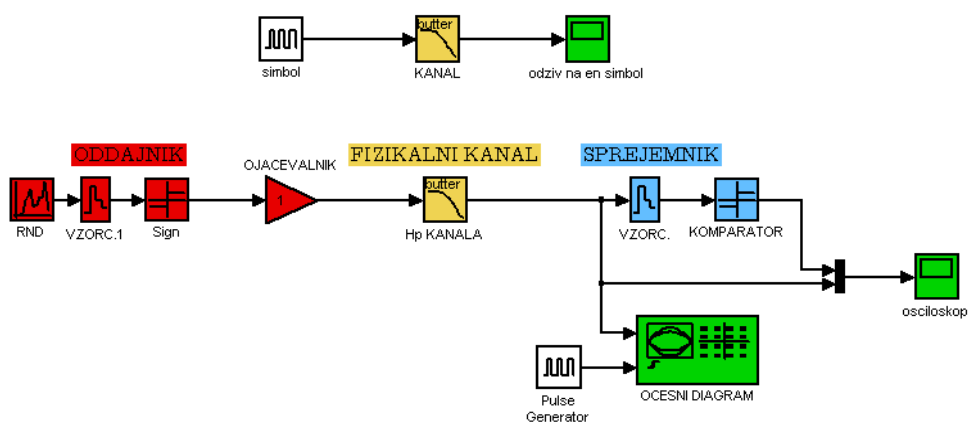
Če izberemo previsoko mejno frekvenco sita v sprejemniku, bodo nastopale napake zaradi šuma, pri prenizki mejni frekvenci sita pa bodo napake predvsem posledica intersimbolne interference. Učinek povečane moči šuma in intersimbolne interference merimo s štetjem napačno detektiranih simbolov v sprejemniku. Optimalno nastavitvev mejne frekvence lahko ugotovimo eksperimentalno. Poskus ponovimo za različne vrednosti gostote šuma na kanalu N_0 .

Simulink

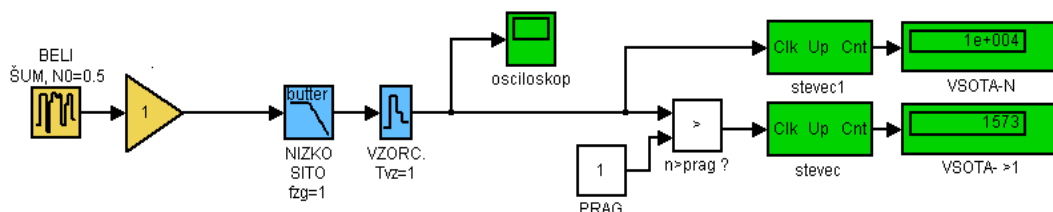
S-1) Disperzija impulzov in ISI

Ocenite velikost intersimbolne interference pri prenosu pravokotnih impulzov!

- za model kanala izberemo najprej nizko sito prvega reda z mejno frekvenco $f_{zg}=f_s$ in preverite rezultate modeliranja s teoretičnim modelom !
- na osnovi opazovanja odprtine očesa določite potek ISI(f_{zg}) za primer, če je kanal "ostro" nizko sito (izberite visok red Butterworthovega sita) !



S-2) Vpliv šuma na število napak



Preverite lastnosti šumnega izvora:

- nastavite gostoto šuma N_0 tako, da bo efektivna vrednost šuma v frekvenčnem pasu $(-f_{zg}, f_{zg})$ enaka 1 ! $n_{eff}=2 f_{zg} N_0$
- izmerite relativno frekvenco dogodka $n(k T_{vz}) > 1, 2, 3..$
- postopek ponovite pri polovični mejni frekvenci sita f_{zg} !

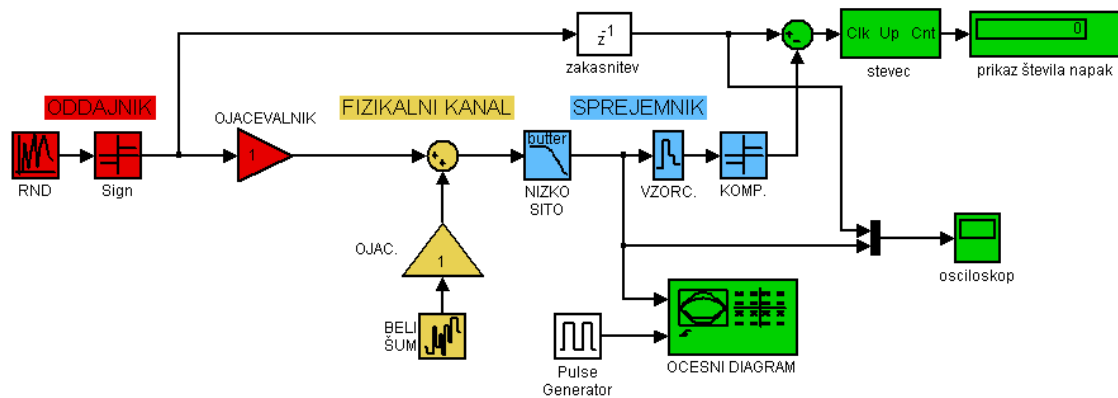
Preverite rezultate modeliranja s teoretičnim modelom !

S-3) PAM oddajnik in sprejemnik

Sestavite PAM oddajnik in sprejemnik in nastavite parametre:

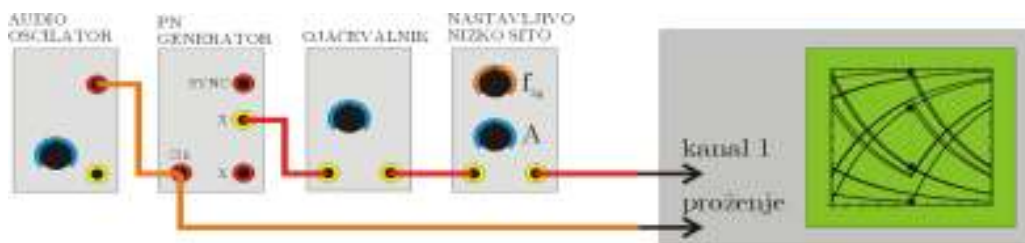
- amplituda signala $V=1$, simbolna hitrost $f_s=1$
- efektivna vrednost šuma v frekvenčnem pasu $(0, f_s)$ $n_{eff}=(1, 1/2, 1/3)$
- mejna frekvenca nizkega sita v sprejemniku: $f_{zg}=(2f_s, f_s, 0.5 f_s)$

Rezultate vpišite v tabelo BER(f_{zg} , n_{ef})



TIMS

T-1) Meritev očesnega diagrama

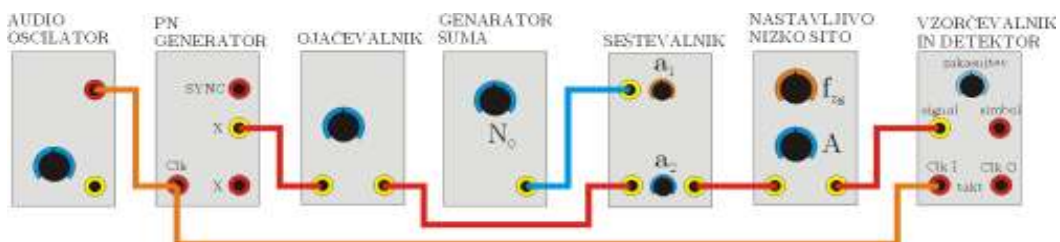


Sestavite PAM-2 oddajnik in nastavite parametre:

- simbolna hitrost $f_s=2000$ Hz
- amplituda signala $X=2V$
- mejna frekvenca nizkega sita $f_{zg}=(4000\text{Hz}, 2000\text{Hz}, 1000\text{Hz}, 500\text{Hz} \dots)$

Izmerite očesni diagram za različne nastavitve f_{zg} in izračunajte ISI !

T-2) PAM-2 prenosni sistem



Sestavite oddajnik in sprejemnik in nastavite parametre:

- simbolna hitrost f_s
- amplituda signala X
- gostota moči šumnega izvora N_0
- mejna frekvenca nizkega sita v sprejemniku f_{zg}

Preverite časovni potek in spekter signala v vseh točkah.

izmerite pogostost napak BER za različne nastavitve N_0 in f_{zg} !