

OSNOVI DIGITALNIH TELEKOMUNIKACIJA

Istorijski gledano prvo su nastali analogni signali. Razvoj savremenih telekomunikacija karakterišu tri osnovna trenda:

1. Digitalizacija
2. Globalizacija
3. Personalizacija

Osnovni koncept je da se u bilo kom trenutku i sa bilo kog mjesta obavi komunikacija (prenos govora, slike, podataka). Ideja digitalizacije počinje 40-tih godina prošlog vijeka, da bi se snažna osnova za realizaciju takvih sistema dobila 60-tih godina, i intenzivan razvoj počeo 80-ih godina.

Digitalni signali se, kao i analogni, mogu prenositi:

1. u osnovnom opsegu
2. modulisanim nosiocem.

OSNOVNI PARAMETRI DIGITALNIH SIGNALA

Elementi signala: svaki od dijelova digitalnog signala se razlikuje od ostalih njegovih dijelova po svojoj prirodi, intenzitetu, trajanju i relativnom položaju ili samo po jednom od ovih parametara.

Svakom elementu signala odgovara **značajno stanje uređaja** koji je proizveo taj element signala, pa se često umjesto termina "element signala" koristi termin **značajno stanje signala**. Pri tome se trenuci u kojima počinju sukcesivna značajna stanja nazivaju **značajnim trenucima**, dok se vrijeme između dva susjedna značajna trenutka naziva **značajnim** ili **signalizacionim intervalom**.

Najjednostavniji način za predstavljanje digitalnih signala je njihova ekvivalencija električnom veličinom, strujom ili naponom. Intenzitetu struje (napona) se daju različite vrijednosti. Ako se te različite vrijednosti značajnog parametra numerišu u okviru jednog konačnog skupa, oni se mogu predstaviti digitalnim signalom. U opštem slučaju broj tih elemenata skupa (broj mogućih vrijednosti značajnog parametra) je M , pa se takav digitalni signal naziva **M-arni digitalni signal**.

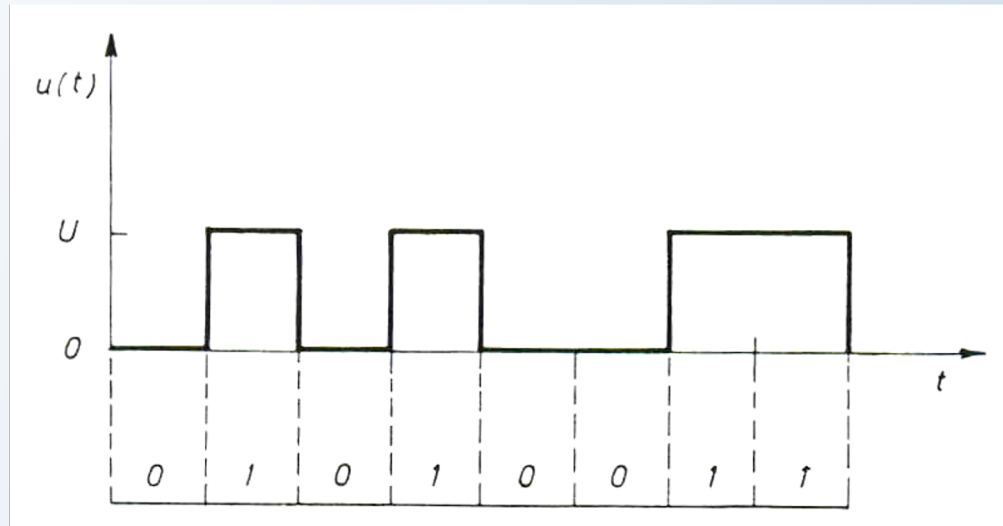
Najjednostavniji način je da se članovi skupa numerišu brojkama binarnog brojnog sistema. Za ovakav sistem potrebne su svega dvije vrijednosti značajnog parametra signala, tj. dvije različite vrijednosti intenziteta konstantnog napona odnosno struje. Stoga ovaj oblik digitalnog signala, **binarni signal** ($M=2$) predstavlja elementarni oblik digitalnog signala

OBLICI BINARNIH SIGNALA

Postoji nekoliko različitih oblika u kojima se javljaju binarni signali. Njihova zajednička osobina je da značajni parametar signala može da ima jednu od dvije moguće vrijednosti.

1. UNIPOLARNI BINARNI SIGNAL BEZ POVRATKA NA NULU– NRZ (*Non Return to Zero*)

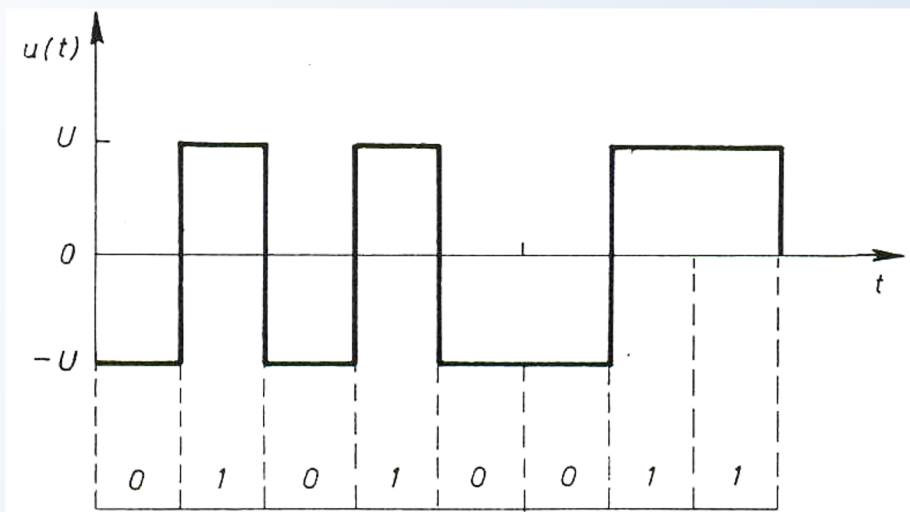
Ima dvije moguće vrijednosti značajnog parametra: 0 i neka vrijednost različita od nule (U). Skup mogućih vrijednosti je 2, pa se elementi numerišu sa 0 i 1, kao na slici.



Ovim signalom se prenosi i jednosmjerna komponenta, a ukoliko je vjerovatnoća pojavljivanja "1" jednaka vjerovatnoći pojavljivanja "0", tj. $P(0)=P(1)=0.5$, srednja vrijednost takvog signala je $U/2$.

2. POLARNI BINARNI SIGNAL

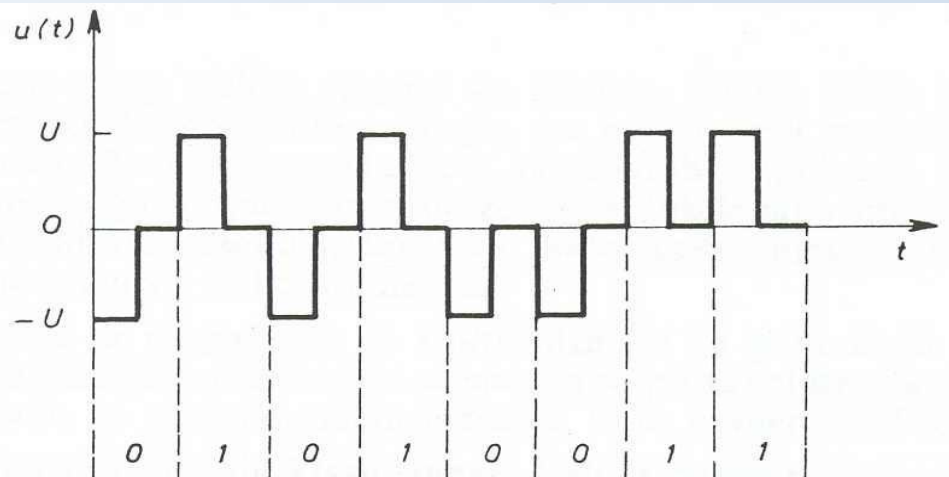
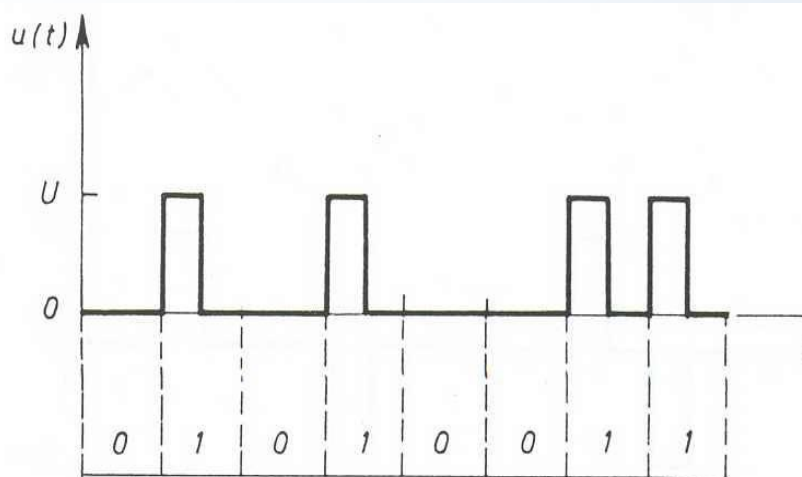
Za razliku od unipolarnog binarnog signala kod koga su dvije moguće vrijednosti značajnog parametra signala bile 0 i U , u ovom slučaju su $+U$ i $-U$. Ovaj signal je prikazan na slici:



Ako se oba parametra javljaju sa istom vjerovatnoćom ($P(0)=P(1)=1/2$) srednja vrijednost signala je jednaka nuli.

3. BINARNI SIGNAL SA POVRATKOM NA NULU - RZ (*Return to Zero*)

Može da se realizuje kao unipolarni ili polarni, s razlikom što stanje koje odgovara binarnoj "1" ne traje čitavo vrijeme T , već samo polovinu tog vremena, a drugu polovinu ima vrijednost nula. Primjer unipolarnog i polarnog signala sa povratkom na nulu je prikazan na slici.



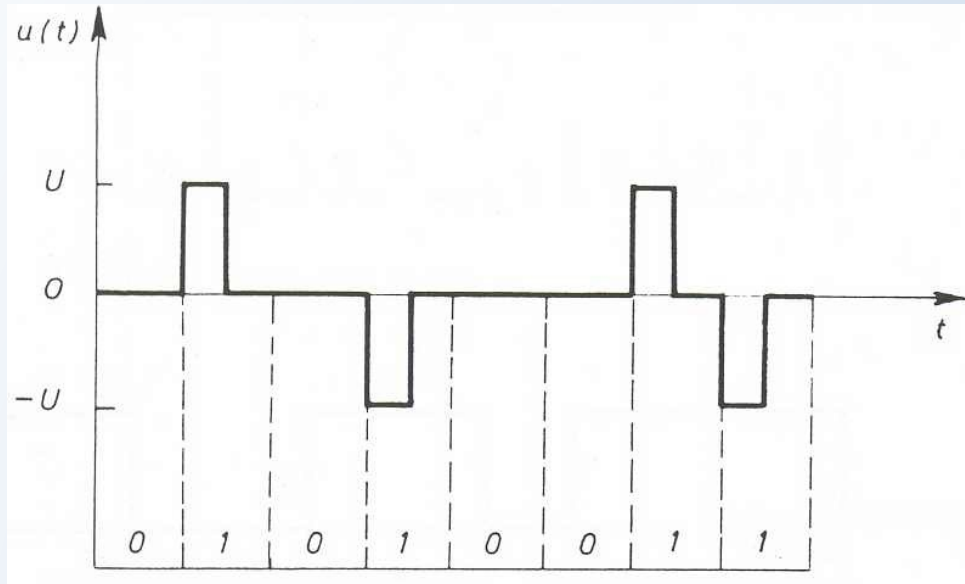
Unipolarni signal sa povratkom na nulu

Polarni signal sa povratkom na nulu

4. BIPOLARNI SIGNAL

Dobija se od unipolarnog (RZ ili NRZ) tako što se svakoj drugoj jedinici promijeni polaritet. Značajni parametar ima tri vrijednosti (+U, -U i 0). Ovakav signal nema jednosmjernu komponentu.

Na slici je prikazan bipolarni signal sa povratkom na nulu.



5. DIFERENCIJALNO KODIRANI BINARNI SIGNAL

Diferencijalno kodiran binarni signal je jedna vrsta binarnog signala na koji je primijenjeno tzv. diferencijalno kodiranje. Ono se vrši na sledeći način: prvi bit u kodiranom signalu se uzima proizvoljno ("0" ili "1"). Potom svakoj "0" u originalnom signalu (prije kodiranja) u diferencijalno kodiranom signalu odgovara promijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval, a svakoj "1" u originalnom signalu odgovara nepromijenjeno stanje u odnosu na prethodni signalizacioni interval u diferencijalno kodiranom signalu.

Primjer diferencijalno kodiranog binarnog signala:

Originalni binarni niz:

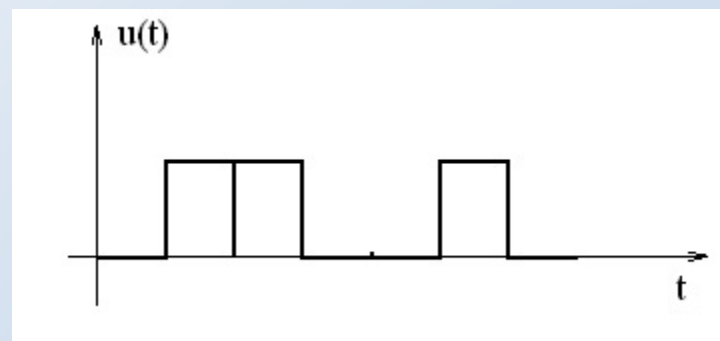
0 1 1 0 0 1 0

Diferencijalno kodiran binarni niz: 1 0 0 0 1 0 0 1

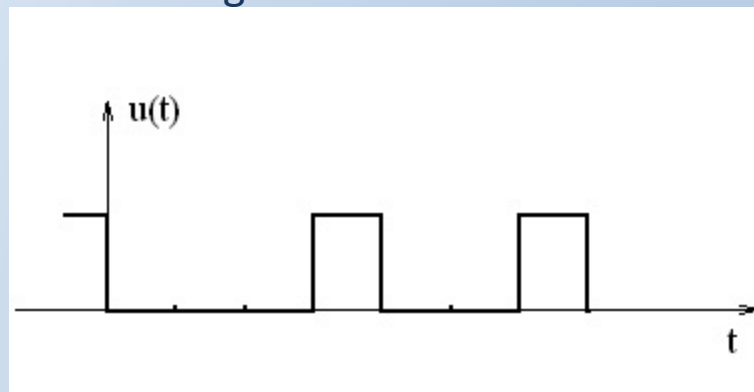
← bira se proizvoljno, ne nosi nikakvu poruku

"0" znači promjenu u odnosu na prethodno stanje

"1" znači nepromijenjeno stanje u odnosu na prethodno



originalni binarni niz



diferencijalno kodirani binarni niz

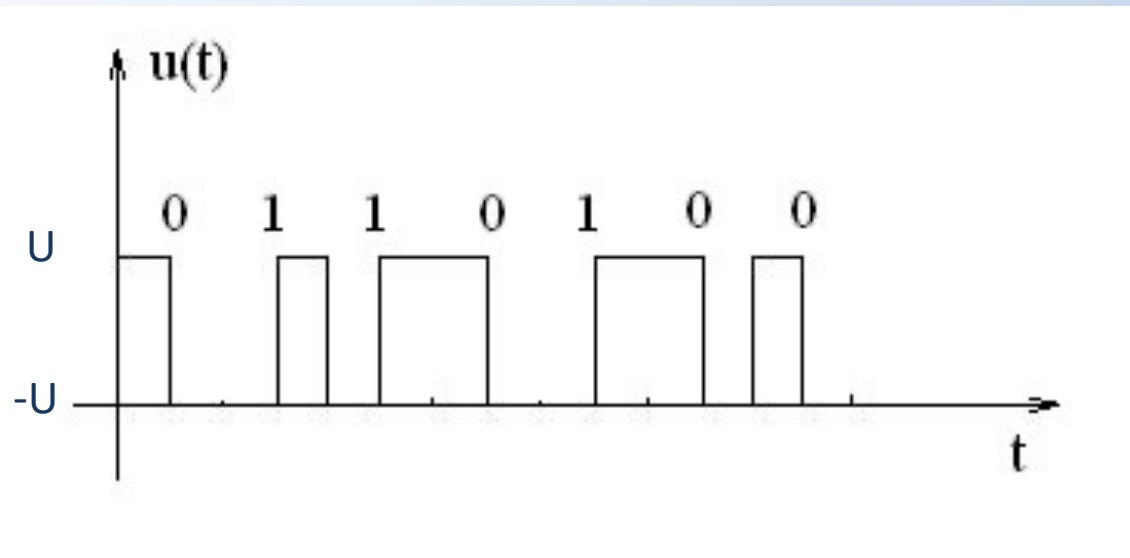
Postupak diferencijalnog kodiranja ima smisla jer se postiže veća koncentracija snage digitalnog signala u jednom opsegu.

Još jedan kod tipičan za digitalne signale je **Manchester** kod koji se ostvaruje tako što se svaka "1" u originalnom signalu predstavlja pozitivnom tranzicijom na sredini signalizacionog intervala u kodiranom signalu, dok se svaka "0" u originalnom signalu predstavlja negativnom tranzicijom na sredini signalizacionog intervala. Tamo gdje se javljaju dva ista binarna elementa jedan do drugog (kombinacija 00 ili 11) u kodiranom signalu se dodaje nova tranzicija na granici ta dva značajna intervala (ona ne nosi nikakvu informaciju).

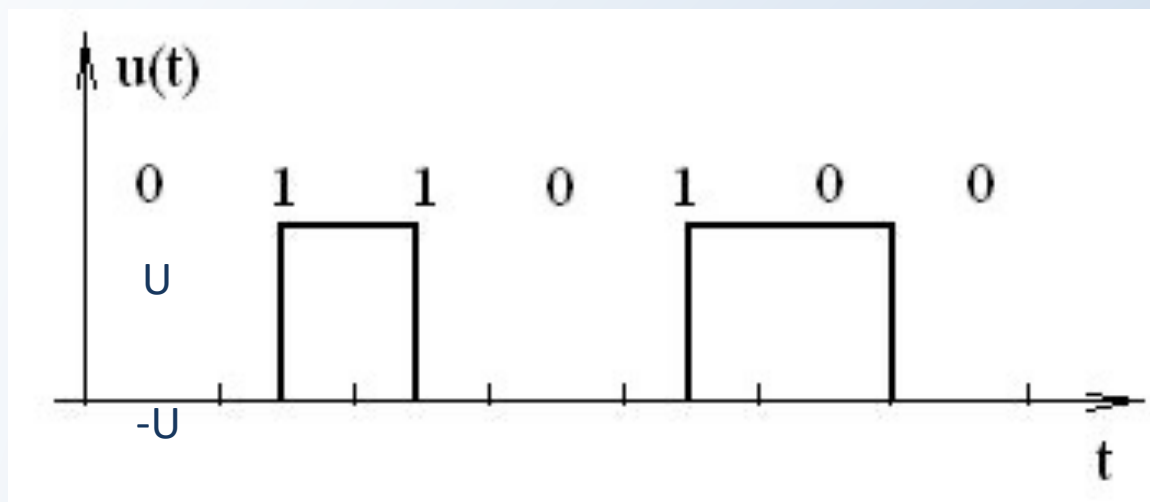
Primjer *Manchester* kodiranog signala:

Originalni signal: 0 1 1 0 1 0 0

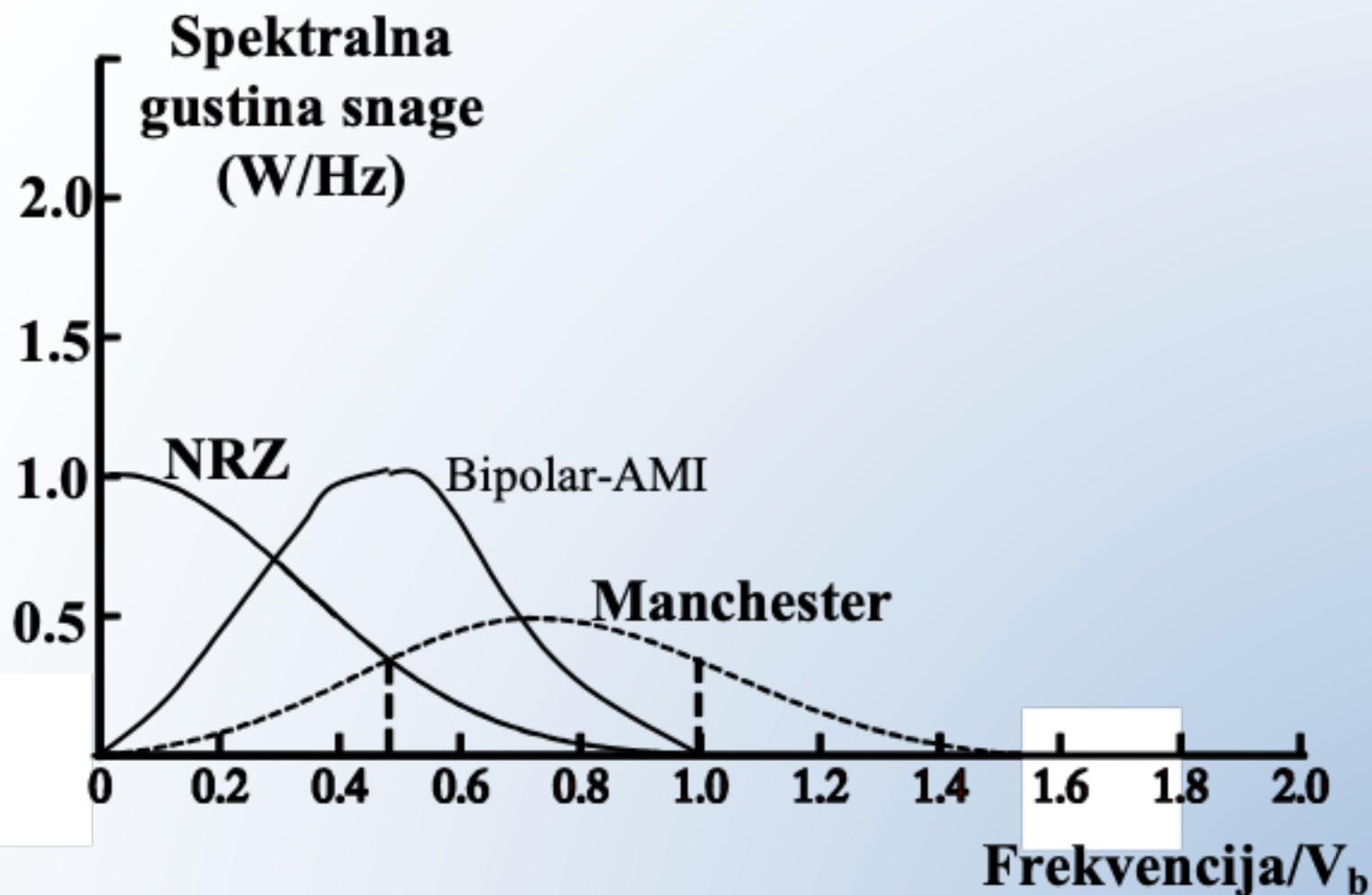
Kodirani signal je prikazan na slici.

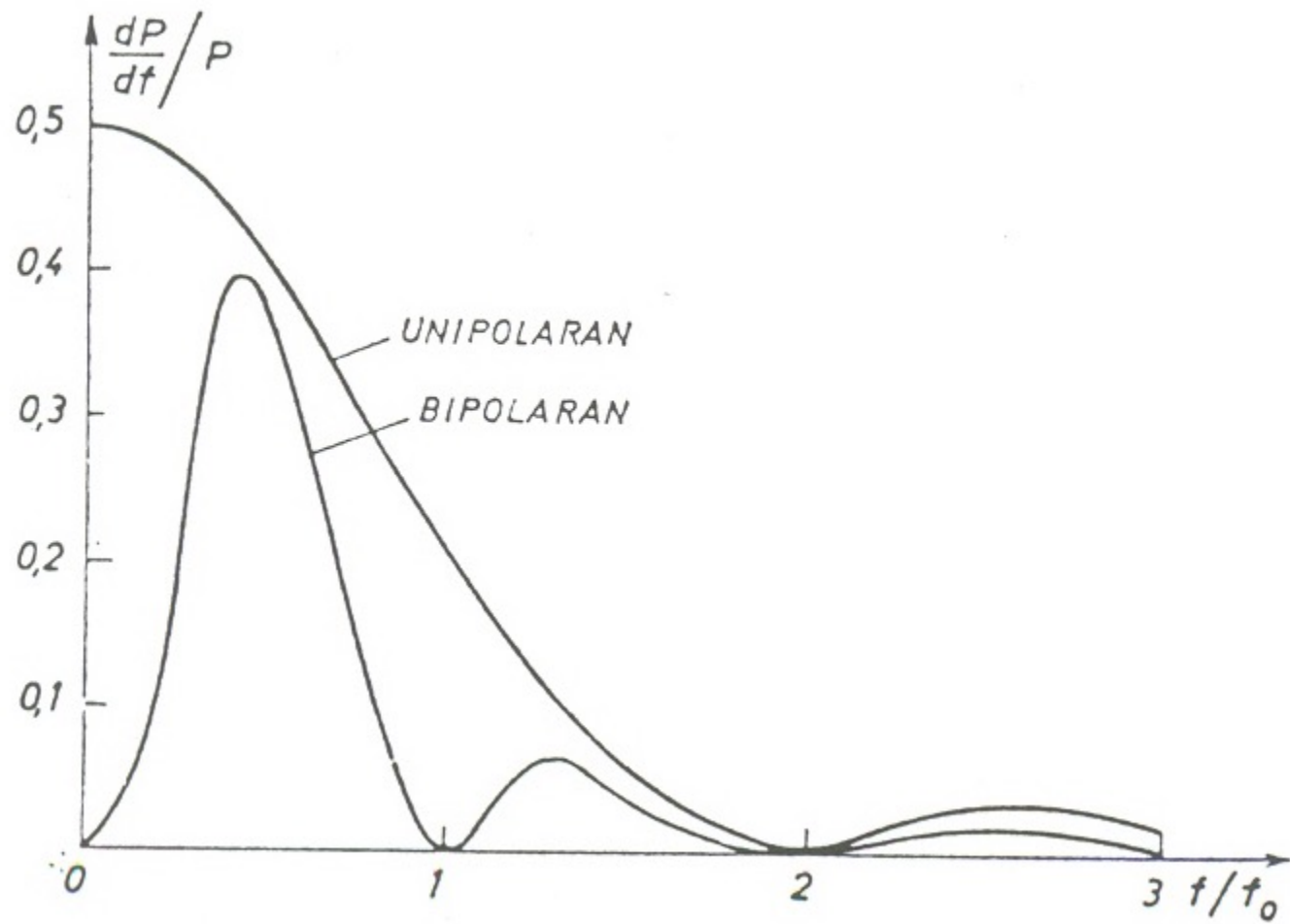


Često korišćeni kod je i **Miller**-ov kod u kome je svaka "1" predstavljena tranzicijom na sredini signalizacionog intervala dok za "0" nema tranzicije. U slučaju da se jave dvije "0" jedna za drugom uvodi se tranzicija između ta dva intervala koja ne nosi nikakvu poruku. Dvije uzastopne "1" podrazumijevaju jednu pozitivnu jednu negativnu tranziciju. Primjer **Miller**-ovog koda je dat na slici:



Kodiranjem se vrši oblikovanje spektra signala prema sistemu za prenos u cilju koncentrisanja spektra snage, ali i ostvarivanje određenog stepena sinhronizacije predajnika i prijemnika.





M-ARNI DIGITALNI SIGNAL

Za razliku od binarnih signala koji u svakom značajnom intervalu mogu da imaju jednu od dvije moguće vrijednosti značajnog parametra, značajni parametar M-arnog signala može da ima jednu od M mogućih vrijednosti koje odgovaraju određenim naponskim stanjima. Na primjer, ako bi se usvojio sistem u kome je $M = 4$, dakle kvaternarni brojni sistem, digitalni signal bi imao 4 različite vrijednosti značajnog parametra. Takav signal prikazan je na slici.

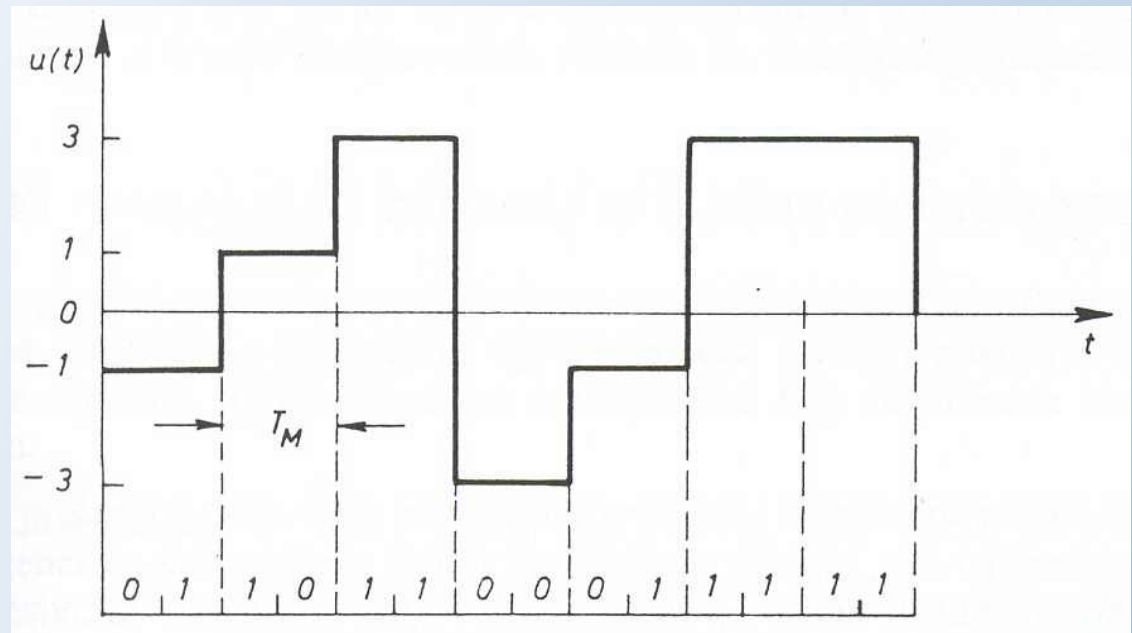
Njega karakterišu 4 različite vrijednosti napona obilježene sa -3, -1, 1 i 3. Ove vrijednosti se mogu ekvivalentirati odgovarajućim binarnim vrijednostima. Pošto je riječ o 4 različita stanja koja treba predstaviti u binarnom brojnom sistemu, svako stanje se predstavlja kombinacijom od 2 binarna elementa, po šemi:

-3 → 00

-1 → 01

1 → 10

3 → 11



U opštem slučaju (M-arni signal) kada postoji M različitih stanja koja se predstavljaju kao kombinacija n binarnih elemenata, važi sledeće:

$$n = \log_2 M$$

U slučaju M-arnih signala, u okviru intervala koji odgovara jednom značajnom stanju signala smješta se n binarnih elemenata. Pošto je uobičajeno da se M-arni signal ekvivalentira binarnim, definiše se parametar koji karakteriše digitalne signale, a to je **digitalni protok**- broj digita koji se prenose u jedinici vremena. U slučaju M-arnih signala definišemo M-arni digitalni protok koji se izražava brojem M-arnih digita u sekundi. Pored M-arnog digitalnog protoka, za svaki M-arni signal može da se definiše ekvivalentni binarni signal, pa time i ekvivalentni binarni protok.

Ako za M-arni signal definišemo njegov digitalni protok, on će iznositi $\frac{1}{T_M}$, gdje je T_M vrijeme trajanja signalizacionog intervala. U slučaju ekvivalentiranja binarnim signalom u tom intervalu je potrebno poslati n bita, pa je ekvivalentni binarni protok:

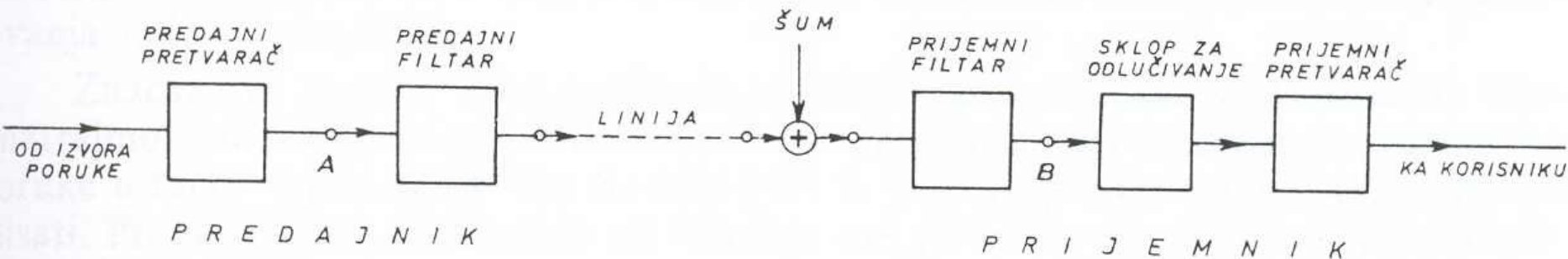
$$\frac{1}{T_b} = \frac{1}{\frac{T_M}{n}} = \frac{n}{T_M} = \frac{1}{T_M} \log_2 M$$

Vrlo često se recipročna vrijednost trajanja signalizacionog intervala $\frac{1}{T_M}$ naziva i **brzinom signaliziranja (prenosa)**. Ona se izražava u **baudima**, a za binarne signale $1/T_b$ u **bit/sec**.

PRENOS DIGITALNIH SIGNALA U OSNOVNOM OPSEGU UČESTANOSTI

Digitalni signal, kakav se pojavljuje na izlazu pretvarača poruke u signal (električni ekvivalent) je u svom osnovnom ili prirodnom opsegu učestanosti. On se može prenositi direktno na udaljeno mjesto prenosnim putevima. Takav prenos se naziva *prenosom u osnovnom opsegu učestanosti*. Kod ove vrste prenosa osnovni signali ne podliježu nikakvoj dodatnoj obradi, u kojoj bi se njihov spektar iz svog osnovnog, originalnog položaja, translirao u neki drugi položaj podesniji za prenos. Sistemi za prenos signala u osnovnom opsegu u pogledu složenosti su najjednostavniji.

Prenos signala u osnovnom opsegu učestanosti primjenjuje se u nekim slučajevima prenosa telegrafskih signala, signala govora, muzike, nepokretne i pokretne slike na principu impulsne kodne modulacije, kao i signala podataka u posebnim, specijalizovanim sistemima. Blok šema sistema za prenos digitalnih signala u osnovnom opsegu je sledeća:



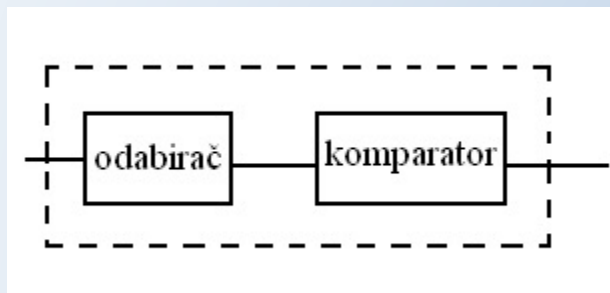
Poruka se u predajnom pretvaraču pretvara u digitalni signal.

Predajnim filtrom propusnikom niskih učestanosti ograničava se spektar signala koji izlazi na liniju veze. Na taj način štite se ostali dijelovi sistema prenosa od eventualnog uticaja komponenti visokih učestanosti u spektru prenošenog digitalnog signala.

Prijemnim filtrom, takođe propusnikom niskih učestanosti, sprečava se ulaz štetnih komponenti visokih učestanosti, bilo da je njihovo porijeklo od nekih drugih sistema, bilo da potiču od šuma sa linije veze.

Sklop za odlučivanje se sastoji iz dva dijela:

1. Odabirač, kojim se uzimaju odbirci primljenog signala u precizno određenim vremenskim intervalima (koji se poklapaju sa signalizacionim intervalima)
2. Komparator, u kome se uzeti odbirci upoređuju sa nekom referentnom vrijednošću koja se naziva ***prag odlučivanja***. Na osnovu odluke generiše se novi digitalni signal koji je, ako nema greške, identičan onom koji je poslat. Taj dio transmisionog procesa naziva se ***regeneracijom***.

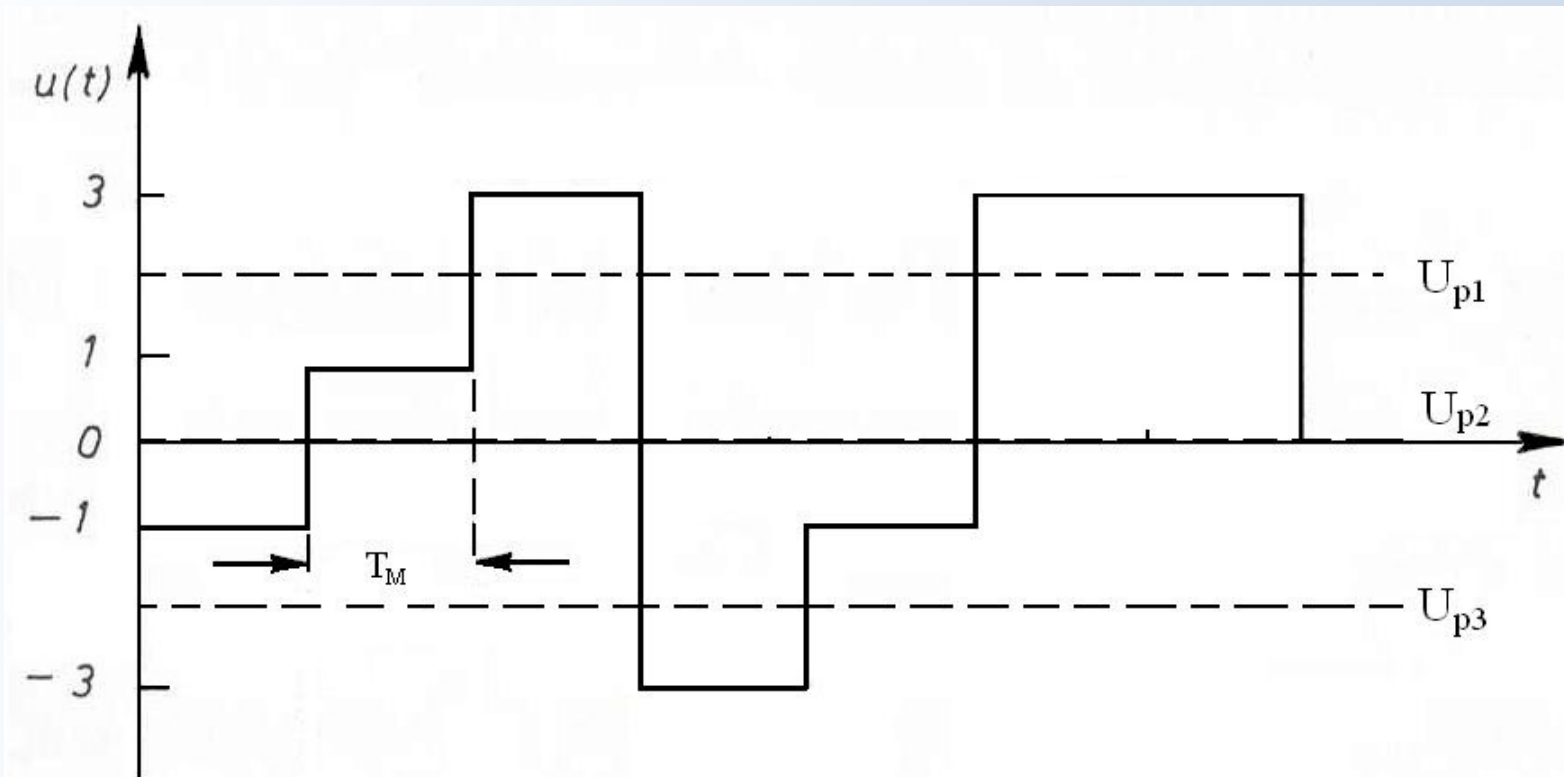


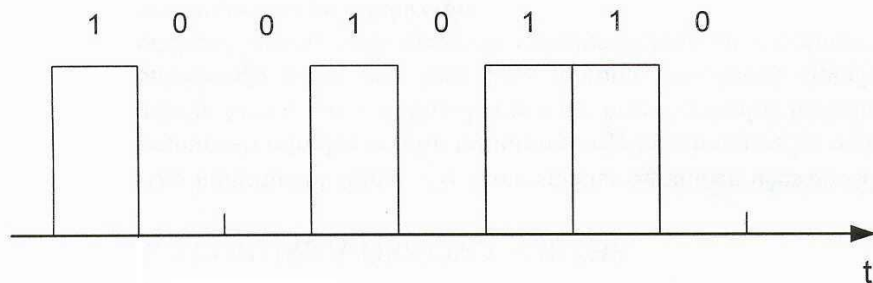
Sklop za odlučivanje

Prijemnim pretvaračem ovaj signal pretvara se u poruku namijenjenu korisniku.

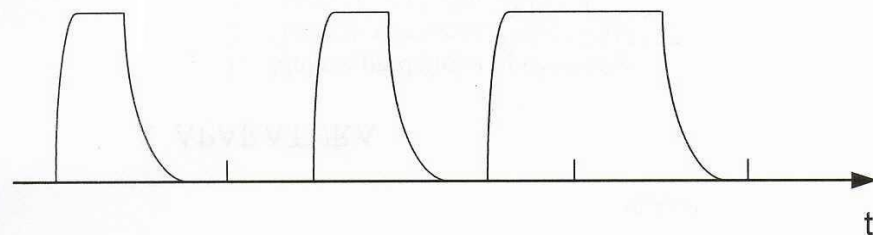
Kada digitalni signal dođe na sklop za odlučivanje uzimaju se odbirci koji se upoređuju sa pragom. Ako su u pitanju dvije moguće vrijednosti signala, koje su jednako vjerovatne, prag se postavlja na sredinu između te dvije vrijednosti (u slučaju polarnog binarnog signala čije su moguće vrijednosti značajnog parametra $+U$ i $-U$ prag se postavlja na 0). Sve vrijednosti odbiraka koje su iznad praga se tretiraju kao stanje "1", a one koje su ispod vrijednosti praga tretiraju se kao "0".

U slučaju kvaternarnog signala postoje 4 moguće vrijednosti značajnog parametra, pa komparator funkcioniše tako što postavlja 3 vrijednosti praga (u opštem slučaju M -arnog signala postavljaju se $M-1$ vrijednosti praga), po jedan na sredini između svake susjedne vrijednosti.

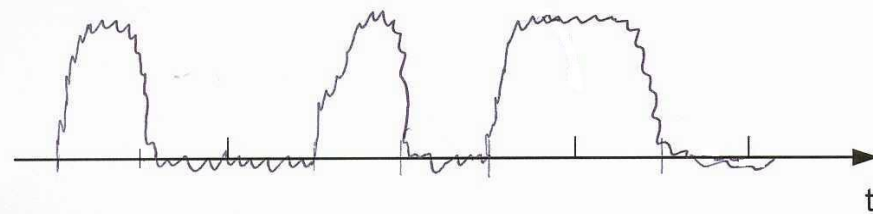




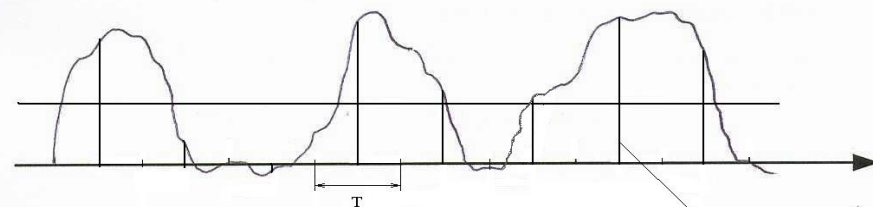
Signal na izlazu iz predajnog pretvarača-digitalni signal.



Prolaskom kroz predajni filter dolazi do izobličenja signala

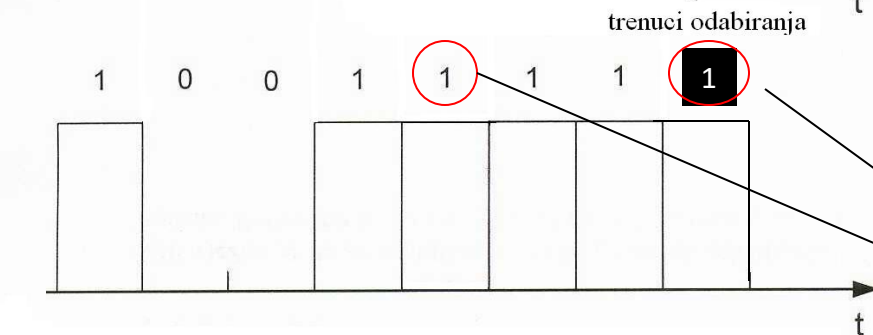


Na liniji veze se signalu superponira šum



Prolaskom kroz prijemni filter šum se ograničava (uskopojasni šum).

Ovaj signal dolazi na sklop za odlučivanje i na osnovu odbiraka (uzetih u sredini signalizacionog intervala) regeneriše se signal.



Signal na izlazu prijemnika, sa greškama koje su se desile u prenosu.

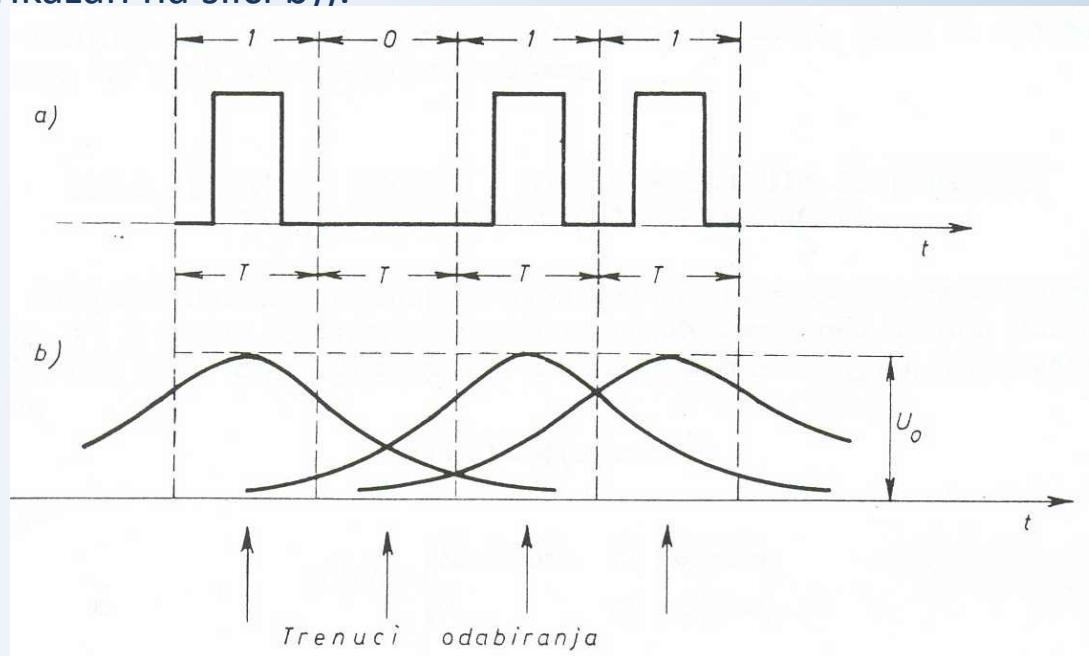
U osnovi postoje dva razloga za pojavu greške:

1. Ograničen propusni opseg prijemnog i predajnog filtra, što dovodi do izobličenja signala
2. Prisustvo šuma koji se superponira signalu, pa u procesu odlučivanja može da se donese pogrešna odluka o vrijednosti značajnog parametra signala.

INTERSIMBOLSKA INTERFERENCIJA (ISI)

U sistemima za prenos u osnovnom opsegu, digitalni signal generisan u pretvaraču poruke u signal je u obliku pravougaonih impulsa. U takvom svom obliku on ne stiže na mjesto prijema. Samo prisustvo predajnog i prijemnog filtra na transmisionom putu, kao i prenosni medijum svojom prirodom, čine da cijeli sistem prenosa ima karakter propusnika niskih učestanosti. Zbog toga se okomite ivice impulsa deformišu, impulsi se šire, a mogu se pojaviti i oscilovanja njihove amplitude.

Značaj ove pojave, čisto kvalitativno, može se ocijeniti na sledeći način. Digitalni signal na izlazu iz pretvarača poruke je kao na slici (slučaj a)). Tokom prenosa signal će se deformisati (pretpostavimo da svakom od impulsa ove povorke, na ulazu u sklop za odlučivanje odgovara deformisan oblik prikazan na slici b)).



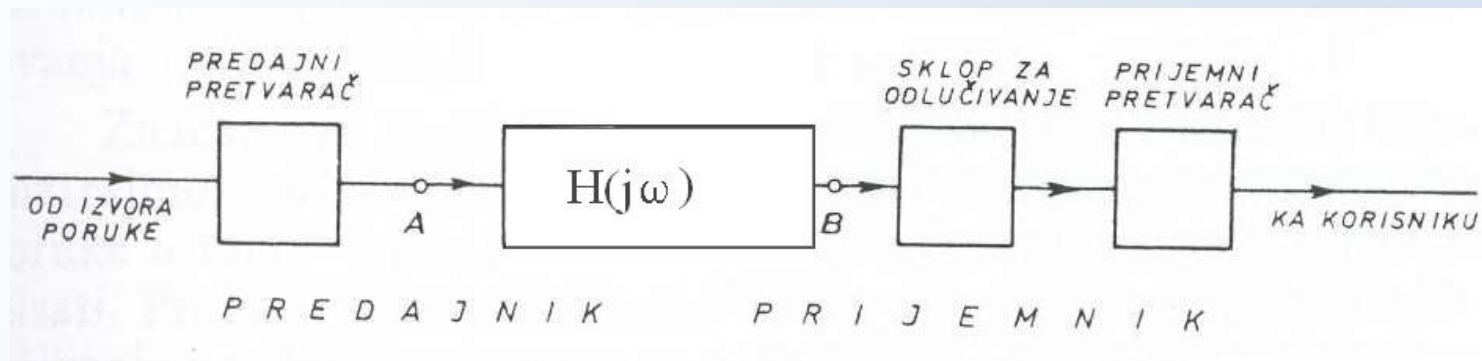
Prijemni odabirač uzima odbirke ovakvog primljenog signala u regularno raspoređenim tačkama odabiranja. Perioda odabiranja je jednaka trajanju jednog signalizacionog intervala T . Intenzitet svakog uzetog odbirka odgovara poslatom znaku odnosno pauzi, ali isto tako se ovoj vrijednosti superponira u posmatranoj tački odabiranja i niz vrijednosti koje potiču od impulsa poslatih u ostalim signalizacionim intervalima. Neki put, baš ovaj dodatak može da bude od presudnog značaja u donošenju odluke o tome što je poslato. Naime, pretpostavimo da je prag odlučivanja u sklopu za odlučivanje postavljen na vrijednost polovine intenziteta U_0 koji odgovara binarnom digitu "1". Znači, svaki odbirak čiji je intenzitet veći od $1/2 U_0$ interpretiraće se kao "1", a svaki koji je manji od $1/2 U_0$ kao "0". Ako je, na primjer, u tački odabiranja u drugom intervalu sa prethodne slike suma intenziteta svih "repova" koji potiču iz ostalih signalizacionih intervala veća od vrijednosti praga, sklop za odlučivanje će ovakav odbirak interpretirati kao "1" umjesto "0" koja je zaista poslata.

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***.

Interferencija među simbolima, 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 dodatno zauzimanje 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.

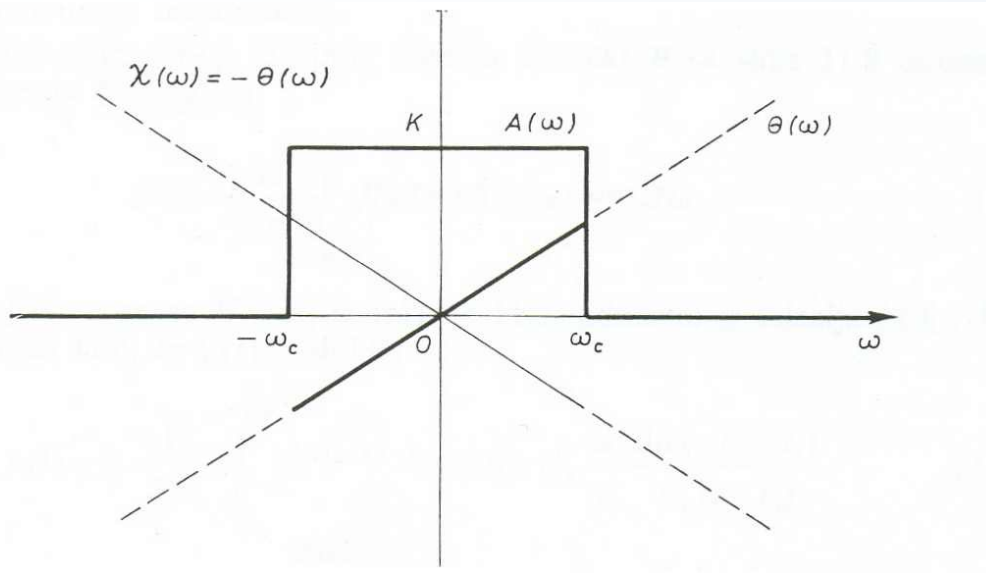
IDEALAN SISTEM I NAČIN KAKO DA SE IZBJEGNE INTERSIMBOLSKA INTERFERENCIJA

Pretpostavimo da je sistem prenosa sa slike takav da se njegov dio između tačaka A i B smatra idealnim propusnikom niskih učestanosti.



Tada, taj dio sistema može da se opiše funkcijom prenosa $H(j\omega)$ koja je definisana izrazom:

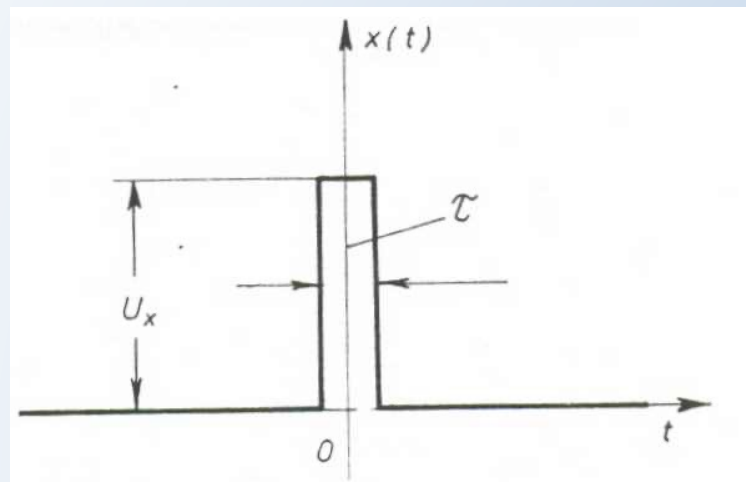
$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)}$$



$$A(\omega) = \begin{cases} K = \text{const} & \text{za } |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \text{za } |\omega| > \omega_c \end{cases}$$

$$\theta(\omega) = \omega t_0, \quad t_0 = \text{const}$$

Neka je signal kojim se pobuđuje idealni sistem prenosa u tački A usamljeni impuls vrlo kratkog trajanja τ i amplitude U_x .



Fourierova transformacija funkcije $x(t)$ koja opisuje ovakav signal je:

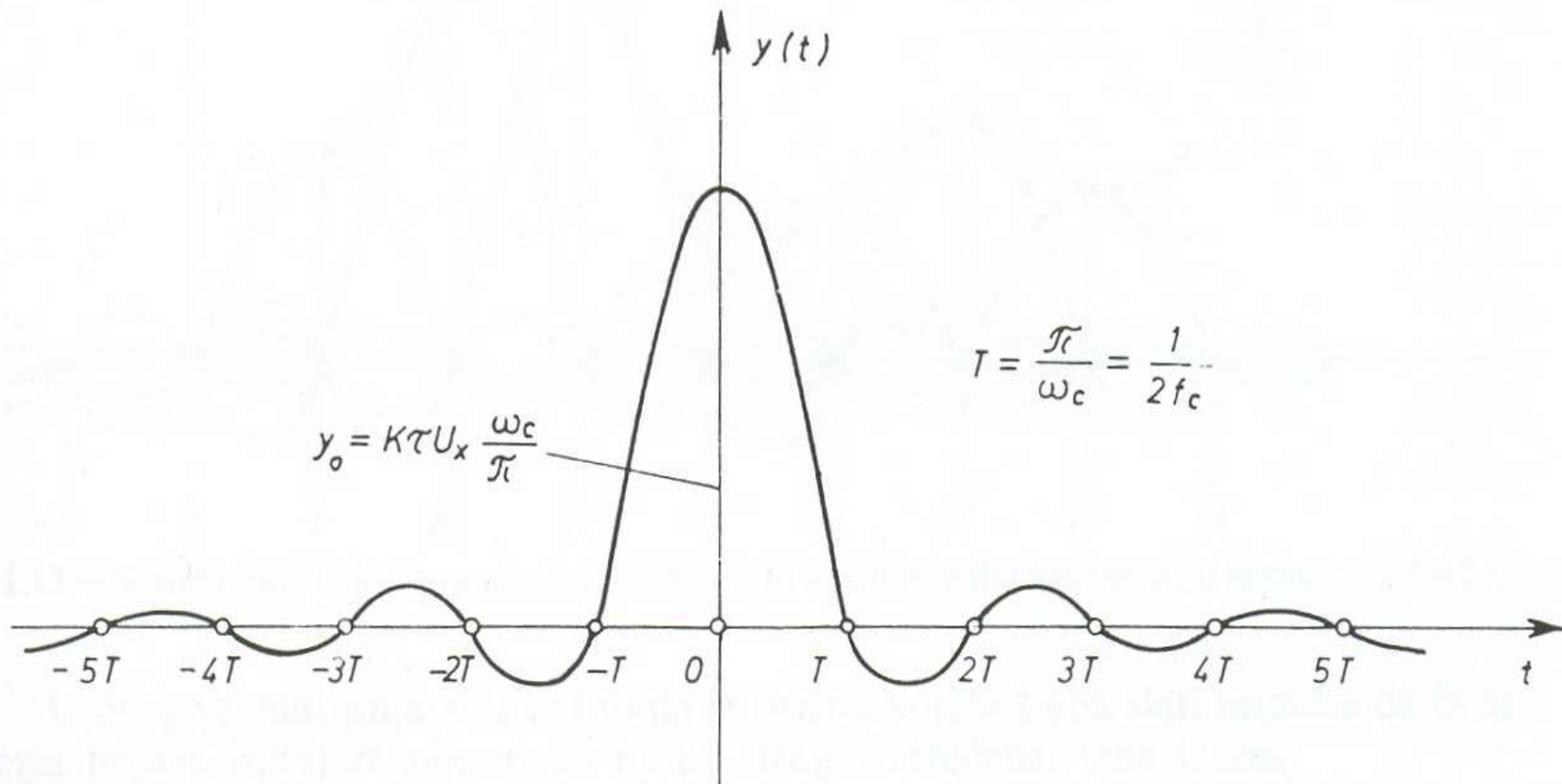
$$X(j\omega) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} U_x e^{-j\omega t} dt \approx \tau U_x$$

Odziv pretpostavljenog idealnog sistema na opisanu pobudu je:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = K \frac{\tau U_x}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{j\omega(t-t_0)} d\omega = K \tau U_x \frac{\omega_c}{\pi} \frac{\sin \omega_c(t-t_0)}{\omega_c(t-t_0)}$$

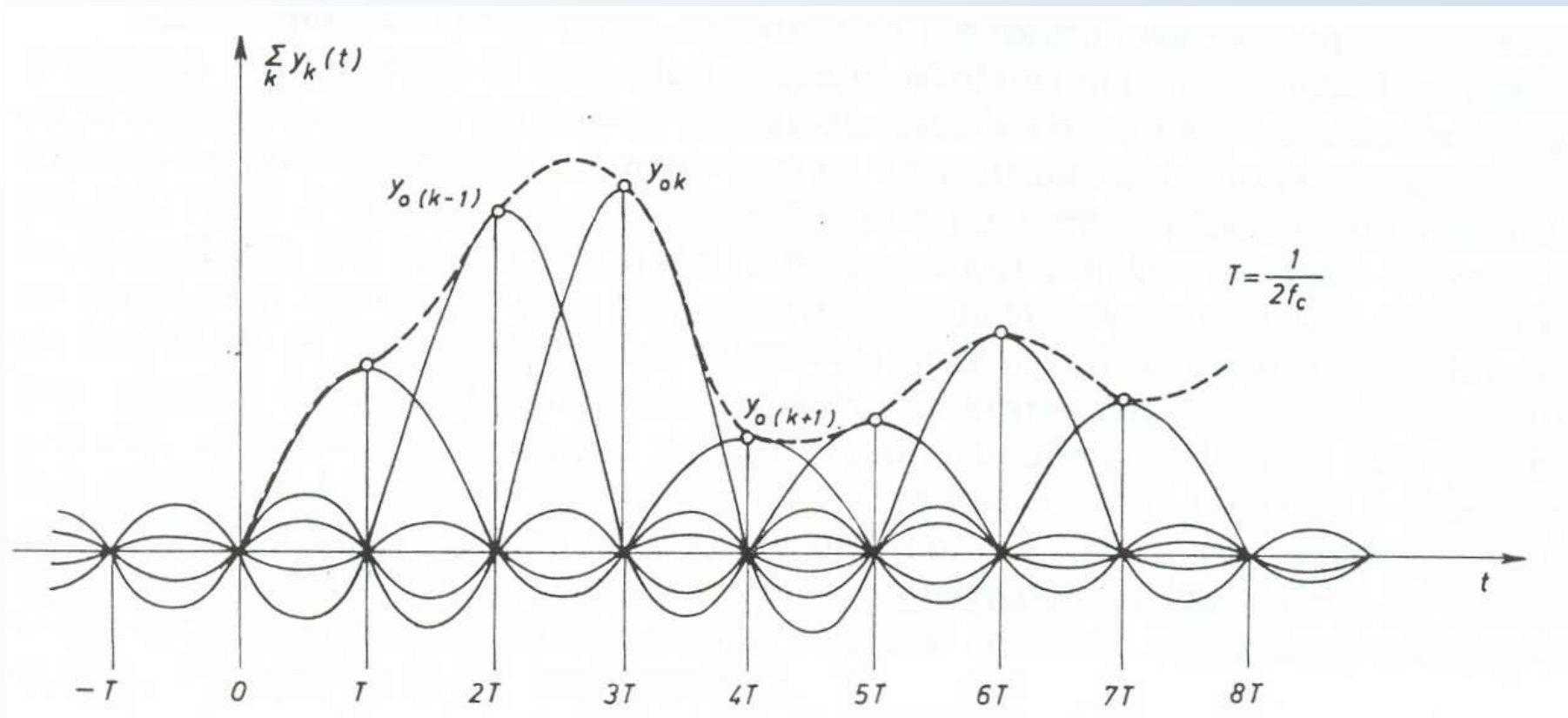
Ako zanemarimo kašnjenje ($t_0=0$), odziv na pobudu usamljenim pravougaonim impulsom je:

$$y(t) = K \tau U_x \frac{\omega_c}{\pi} \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t} = y_0 \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t}$$



Odziv idealnog sistema propusnika niskih učestanosti na pobudni signal u vidu impulsa vrlo kratkog trajanja

Pošto je poznat odziv sistema na usamljeni impuls, razmotrimo situaciju kada se javlja više impulsa širine τ , smještenih u trenucima $T, 2T, \dots, nT$, amplituda $U_{x1}, U_{x2}, \dots, U_{xn}$. U ovim okolnostima, odziv idealnog sistema na ovakvu povorku će se dobiti superpozicijom svih pojedinačnih odziva $y_k(t)$, gdje je $y_k(t)$ odziv sistema na pobudu poslatu u k -tom signalizacionom intervalu. Naravno, to je moguće učiniti jer se radi o linearnom sistemu. Dobijeni složeni odziv sa svojim komponentama prikazan je na slici.



Jasno je da svaka od amplituda ove složene funkcije u tačkama $t=kT$, gdje je $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, a $T=1/2f_c$ isključivo zavisi od amplitude impulsa poslatog u k -tom signalizacionom intervalu. Drugim riječima, ako se prijemnim odabiračem uzme odbirak u sredini k -tog signalizacionog intervala u kom je bio poslat impuls amplitude U_{xk} onda će amplituda odbirka biti

$$y_{ok} = K\tau U_{xk} \frac{\omega_c}{\pi}$$

Ona ne zavisi od impulsa u ostalim signalizacionim intervalima zato što svaki od njihovih "repova" u tački odabiranja ima vrijednost 0. To znači da neće doći do preklapanja impulsa.

Dakle, neće postojati intersimbolska interferencija. Brzina kojom treba slati impulse da bi se izbjegla pojava intersimbolske interferencije strogo je određena i iznosi:

$$1/T=2f_c$$

ili n -ti dio od $1/T$, gdje je $n= 1, 2, 3\dots$

Brzina $1/T=2f_c$ se naziva **Nyquistovom brzinom**, i to je najveća moguća brzina signaliziranja za prenos digitalnih signala idealnim sistemom, a da ne dođe do pojave ISI. Za signalizacioni interval $T=1/2f_c$ se kaže da predstavlja **Nyquistov interval**.

Prikazani i analizirani primjer se odnosi na idealizovan slučaj i njegova primjena je ograničena zbog:

1. Nemogućnosti fizičke realizacije $H(j\omega)$.
2. Potrebe za potpunom sinhronizacijom predajnika i prijemnika.

Uprkos navedenim ograničenjima dobijeni zaključci su značajni i predstavljaju važan elemenat realizacije praktičnih sistema.