

OSNOVI DIGITALNIH TELEKOMUNIKACIJA

Razvoj savremenih telekomunikacija karakterišu tri osnovna trenda:

1. Digitalizacija
2. Globalizacija
3. Personalizacija

koji su omogućili implementaciju telekomunikacionih mreža međusobno povezanih u kompleksan globalni sistem koji se permanentno razvija. Danas, telekomunikacije karakterišu:

- izuzetno sofisticirana oprema (hardver i software)
- servisi i aplikacije koji imaju ključni značaj za ukupan razvoj društva
- centralna uloga u digitalnoj transformaciji na svim nivoima.

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.

Razvoj digitalnih telekomunikacija:

1937. Alec Reeves predlaže IKM (PCM) kao koncept kojim se redukuje uticaj šuma pri prenosu signala na veća rastojanja..

1948–1950 C. E. Shannon objavljuje fundamentalne radove iz teorije informacija.

1948–1951 Pojavljuju se tranzistorski uređaji.

1950. Multipleksiranje sa vremenskom raspodjelom kanala (TDM) se počinje primjenjivati u telefoniji.

1958. Razvijen je sistem za prenos podataka na velike udaljenosti za vojne svrhe.

1962–1966 Komercijalno ponuđena usluga prenos podataka; IKM se pokazao izvodljivim za prenos govora i TV-a; postavljaju se osnovi digitalnog prenos.

1968–1969 Počinje digitalizacija telefonske mreže.

1970–1975 CCITT (Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy) usvaja IKM (PCM) standard.

1975–1985 Razvijeni optički sistemi velikog kapaciteta; optičke tehnologije dobijaju na značaju i razvijaju se potpuno integrisani komutacioni sistem; digitalna obrada signala mikroprocesorima.

1980–1983 Početak globalnog Interneta zasnovanog na TCP/IP protokolu

1980–1985 Moderne mobilne radio mreže 1. generacije puštene u rad (NMT u Skandinavskim zemljama, AMPS u Sjedinjenim Državama); OSI referentni mrežni model je definisan od strane Međunarodne organizacije za standarde (ISO); počela standardizacija za drugu generaciju mobilnih digitalnih ćelijskih radio sistema.

1985–1990 LAN mreže; završena standardizacija Digitalne mreža integrisanih usluga (ISDN); javne (public) usluge prenosa podataka postaju široko dostupne; optički prenosni sistemi zamjenjuju bakarne sisteme za prenos na velikim udaljenostima; finalizovana standardizacija GSM (Global System for Mobile Communications-2G, digitalne mobilne mreže ćelijske strukture); usvojen SDH (Synchronous Digital Hierarchy) standard za optički prenos digitalnih signala različitih protoka.

1989. Tim Berners-Lee je predložio World Wide Web sistem za upravljanje informacijama, a zatim je uspješno implementirao prvu komunikaciju između HTTP (Hypertext Transfer Protocol) klijenta i servera putem Interneta.

1990–1997 Prvi digitalni mobilni radio ćelijski sistem (GSM) stavljen u komercijalnu upotrebu; deregulacija telekomunikacija u Evropi; zahvaljujući WWW upotreba Interneta i povezanih servisa se brzo širi.

1997–2001 Telekomunikaciona zajednica je deregulisana i razvoj dobija na dinamici; digitalne mobilne mreže, posebno GSM, implementirane širom svijeta; komercijalne aplikacije Interneta rastu; dio konvencionalnih govornih komunikacija je prenet sa javne komutacione telefonske mreže (PSTN) na Internet (VoIP); performanse LAN mreža se poboljšavaju sa napredovanjem Gbits/sec Ethernet tehnologija.

2001–2005 Digitalna TV počinje da zamenjuje analognu TV; širokopojasni pristupni sistemi čine Internet multimedijalne usluge široko dostupnim; usluga telefonije se pretvara u uslugu personalizovane komunikacije sa povećavanjem penetracije ćelijskih mobilnih sistema; 2G mobilni radio sistemi se razvijaju u pravcu omogućavanja prenosa podataka većom brzinom na principima komutacije paketa (3G); pojavljuju se smart telefoni; globalna telekomunikaciona mreža evoluirala ka zajedničkoj mrežnoj platformi na bazi komutacije paketa za sve vrste usluga.

2005 – Danas Digitalna TV pruža interaktivne usluge pored servisa emitovanja; 4G-5G mobilni radio sistemi i WLAN tehnologije obezbeđuju poboljšane usluge prenosa podataka za mobilne korisnike (mobilni Internet); razvijaju se i implementiraju cloud computing, Internet of Things i druge inovativne tehnologije kao podrška e-servisima i aplikacijama; softwarizacija i virtuelizacija mrežnih funkcija (SDN-Software Defined Networks).

Najvažnije prednosti digitalnih telekomunikacija u odnosu na analogne su:

- Digitalne funkcije omogućavaju visok stepen integracije.
- Digitalna tehnologija rezultira nižim troškovima, većom pouzdanošću, manjim fizičkim dimenzijama i manjom potrošnjom energije.
- Digitalna tehnologija čini kvalitet komunikacija nezavisnim od udaljenosti.
- Digitalna tehnologija obezbeđuje bolju toleranciju na šum i smetnje.
- Digitalne mreže su omogućile podršku stalno rastućim zahtjevima za prenos podataka.
- Digitalna tehnologija je dovela do novih usluga, koje su uz to dostupnije.
- Digitalni sistem obezbeđuje visok kapacitet prenosa.
- Digitalne mreže karakteriše fleksibilnost.

OSNOVNI PARAMETRI DIGITALNIH SIGNALA

Elementi signala: djelovi digitalnog signala se međusobno razlikuju 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**.

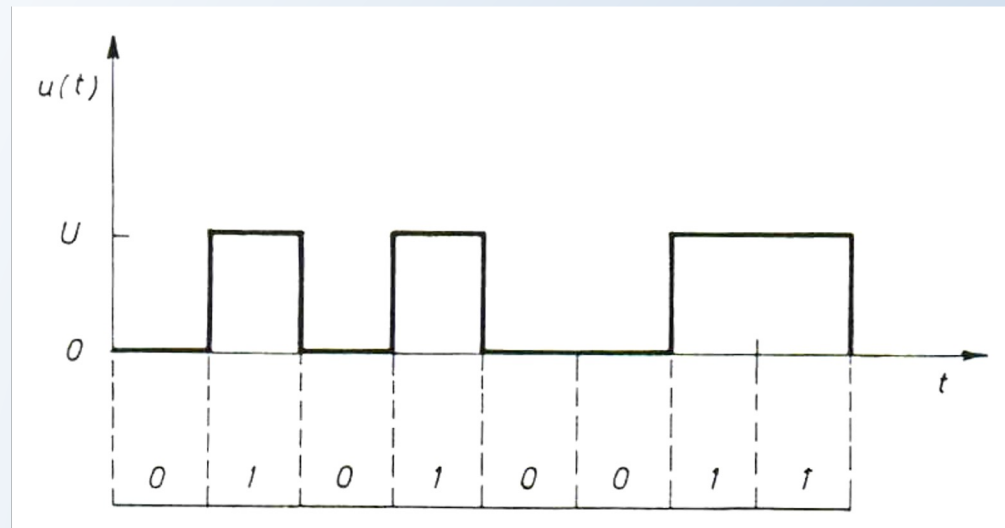
Najjednostavniji način je da se članovi skupa numerišu brojkama binarnog brojnog sistema. Za ovakav sistem potrebne su svega dvije vrijednosti značajnog parametra signala, tj. dvije različite vrijednosti intenziteta konstantnog napona odnosno struje. Stoga ovaj oblik digitalnog signala, **binarni signal**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

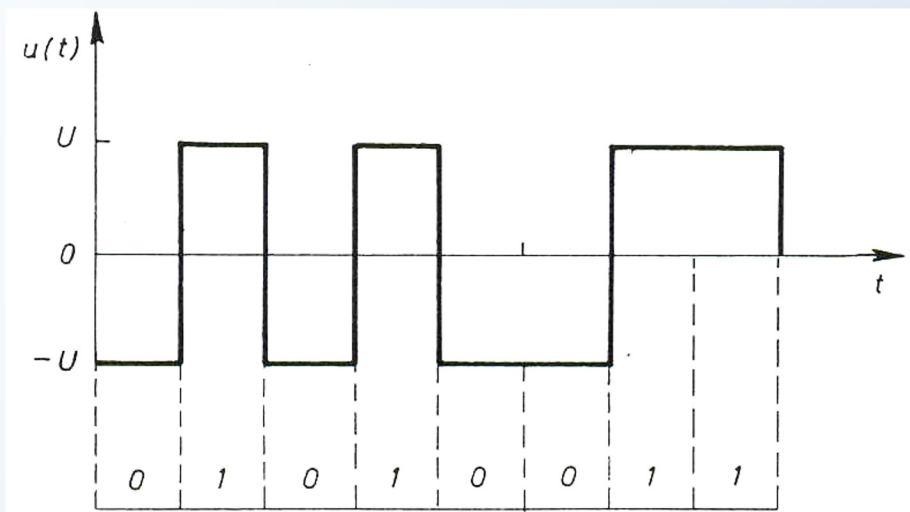
Ima dvije moguće vrijednosti značajnog parametra: 0 i neka vrijednost različita od nule (U). Skup mogućih vrijednosti je 2, pa se elementi numerišu sa 0 i 1, kao na slici.



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

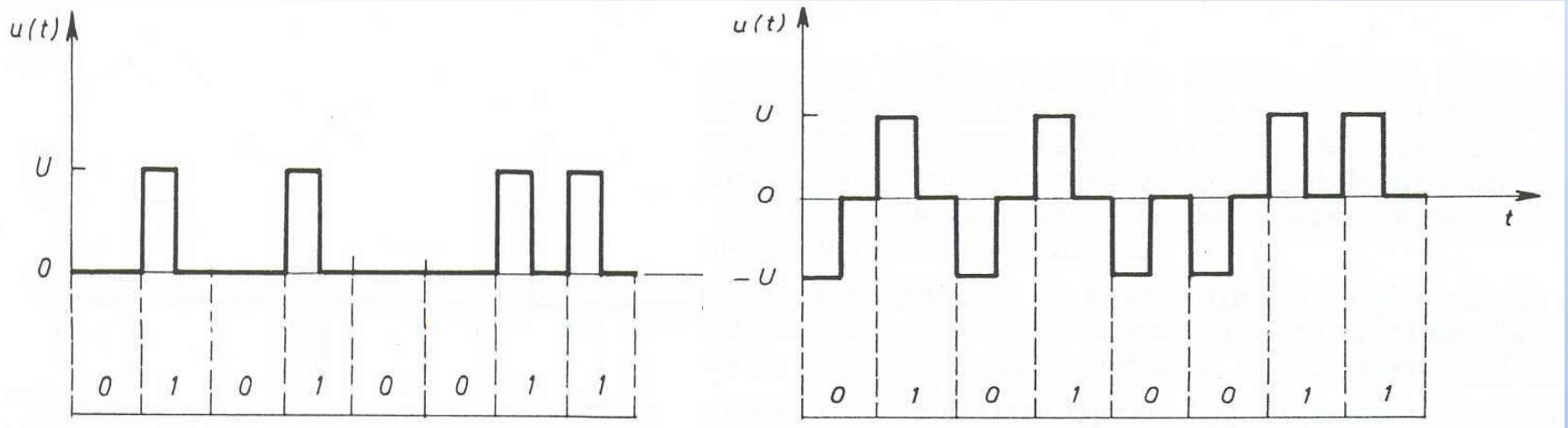
Za razliku od unipolarnog binarnog signala kod koga su dvije moguće vrijednosti značajnog parametra signala bile 0 i U , u ovom slučaju su $+U$ i $-U$. Ovaj signal je prikazan na slici:



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.



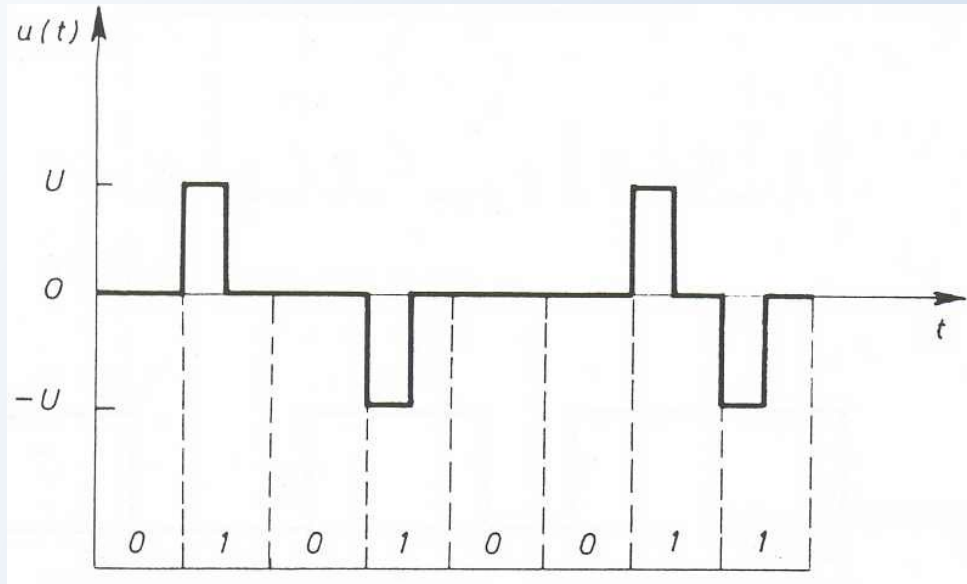
Unipolarni signal sa povratkom na nulu

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

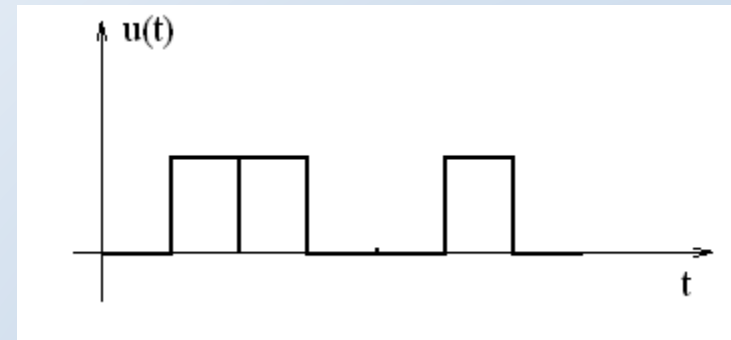
Diferencijalno kodiran binarni niz:

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

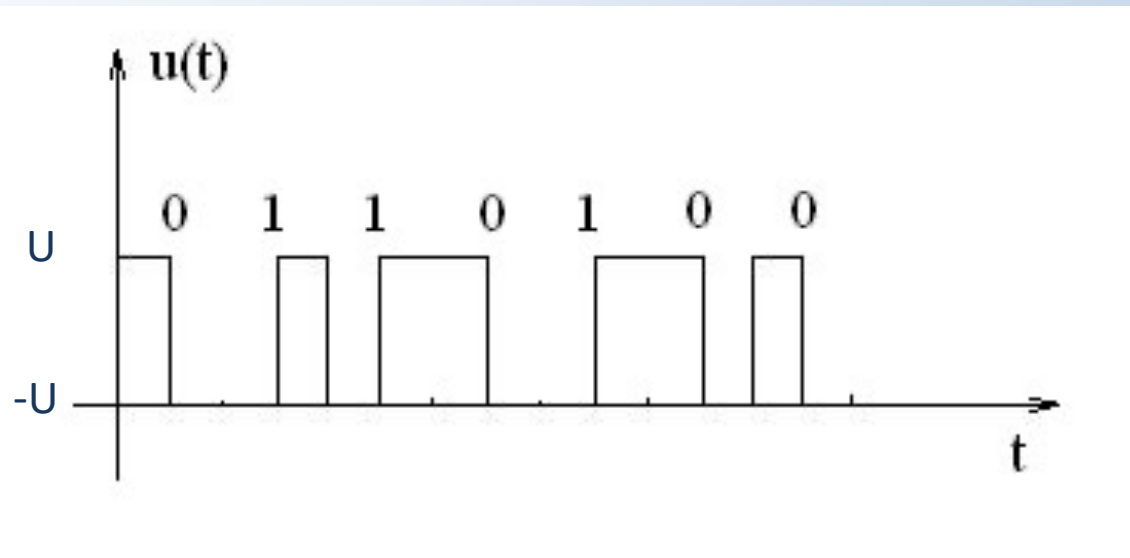
Postupak diferencijalnog kodiranja ima smisla jer se postiže veća koncentracija snage digitalnog signala u jednom opsegu.

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).

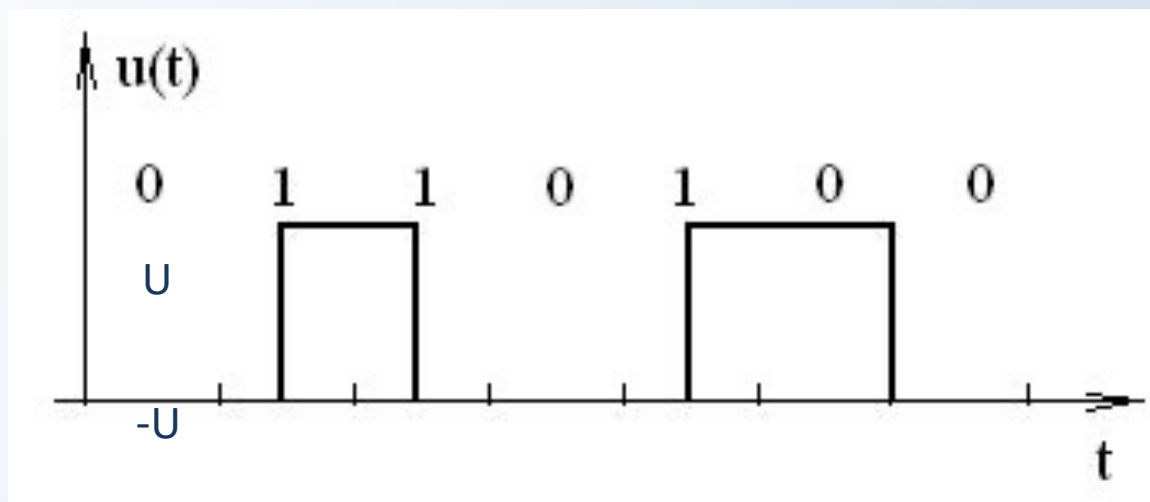
Primjer *Manchester* kodiranog signala:

Originalni signal: 0 1 1 0 1 0 0

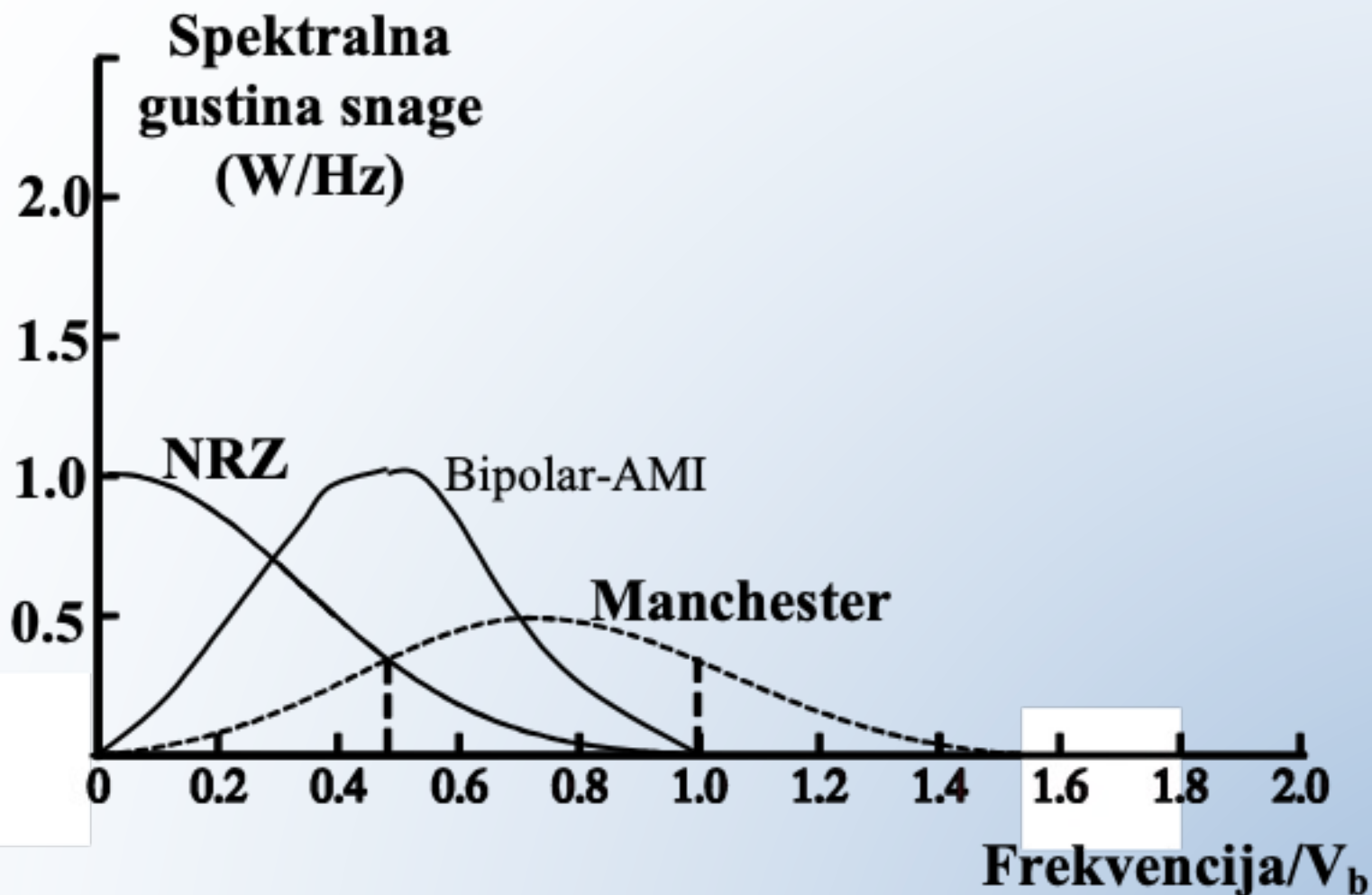
Kodirani signal je prikazan na slici.

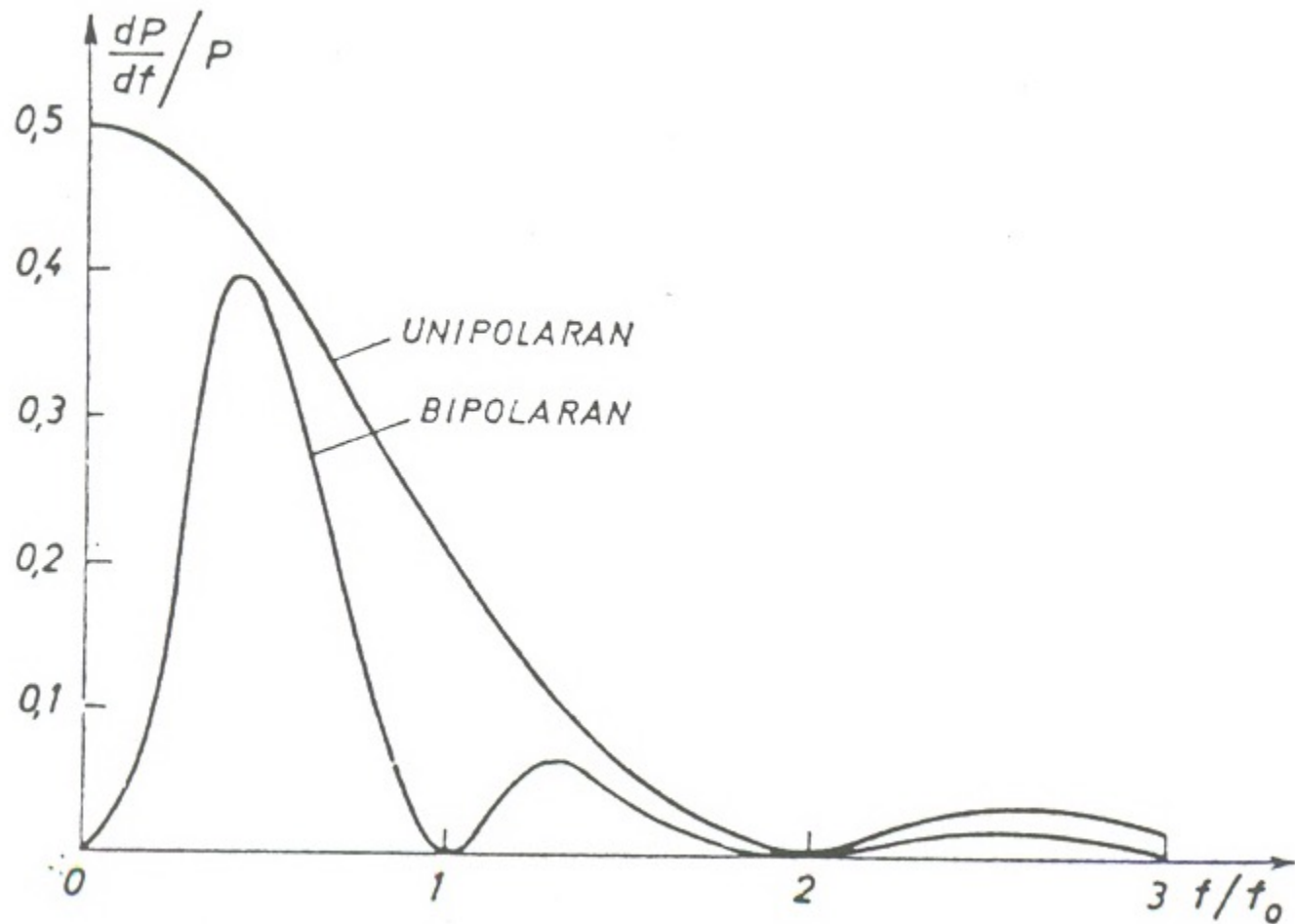


Često korišćeni kod je i **Miller**-ov kod u kome je svaka "1" predstavljena tranzicijom na sredini signalizacionog intervala dok za "0" nema tranzicije. U slučaju da se jave dvije "0" jedna za drugom uvodi se tranzicija između ta dva intervala koja ne nosi nikakvu poruku. Dvije uzastopne "1" podrazumijevaju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



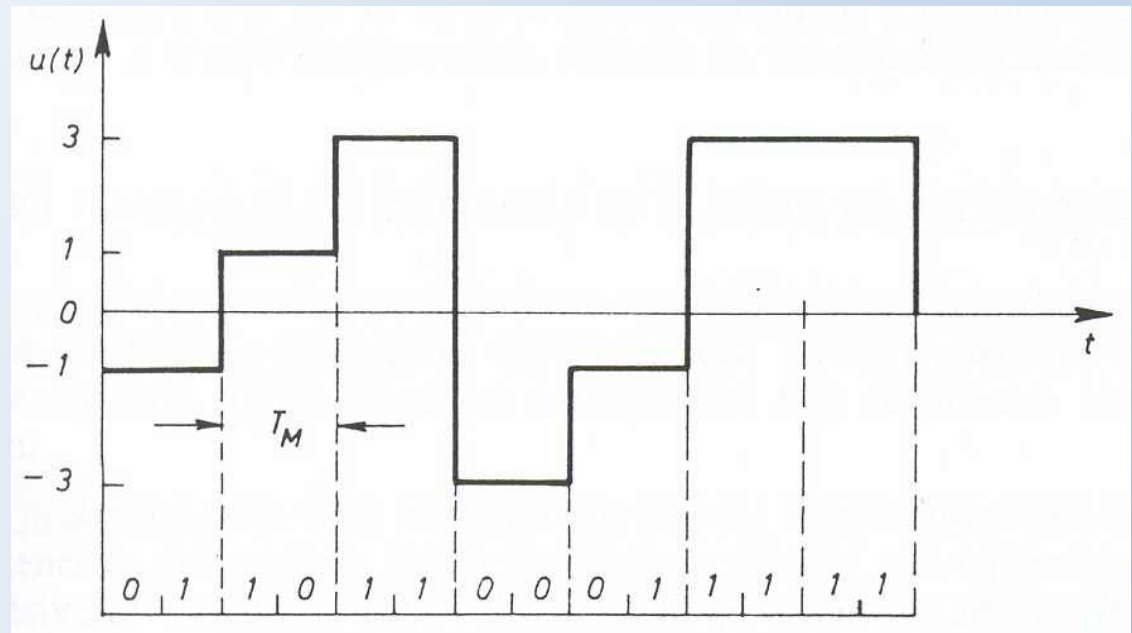


M-ARNI DIGITALNI SIGNAL

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:

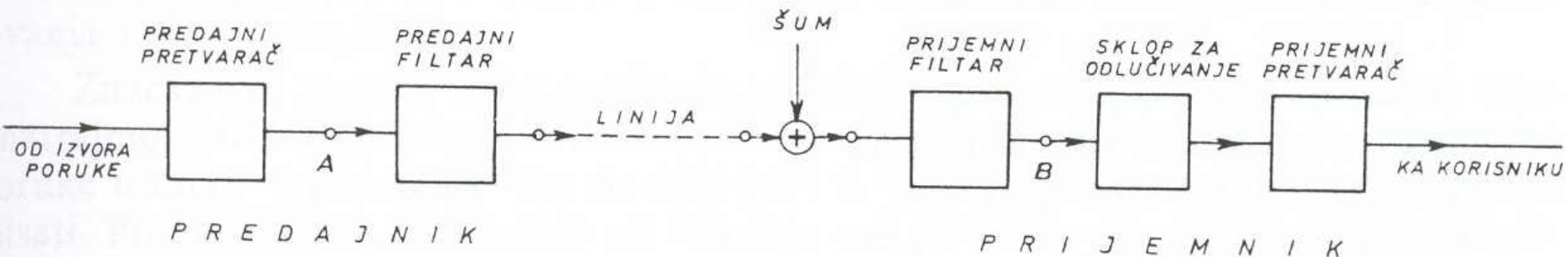
$$\frac{1}{T_b} = \frac{1}{T_M} = \frac{n}{T_M} = \frac{1}{T_M} \log_2 M$$

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:



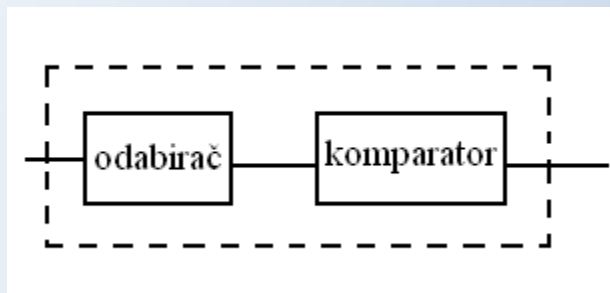
Poruka se u predajnom pretvaraču pretvara u digitalni signal.

Predajnim filtrom propusnikom niskih učestanosti ograničava se spektar signala koji izlazi na liniju veze. Na taj način štite se ostali djelovi 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**.

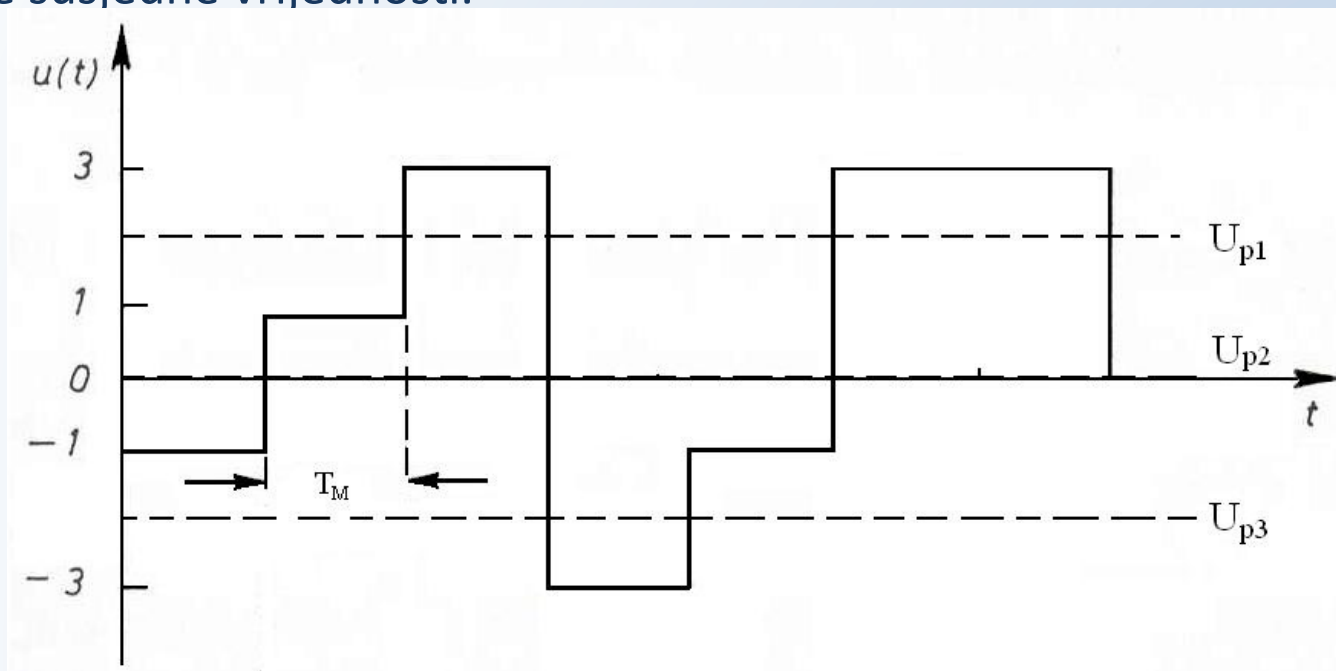


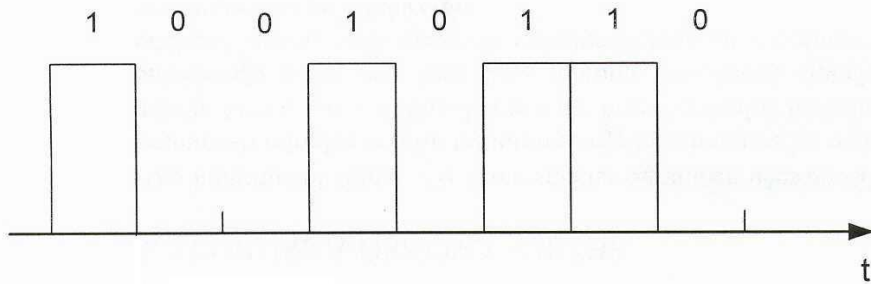
Sklop za odlučivanje

Prijemnim pretvaračem ovaj signal pretvara se u poruku namijenjenu korisniku.

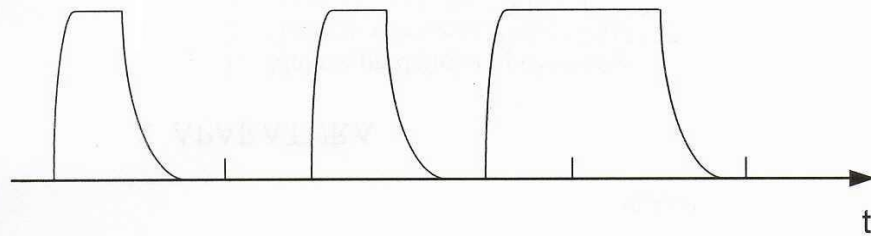
Kada digitalni signal dođe na sklop za odlučivanje uzimaju se odbirci koji se upoređuju sa pragom. Ako su u pitanju dvije moguće vrijednosti signala, koje su jednako vjerovatne, prag se postavlja na sredinu između te dvije vrijednosti (u slučaju polarnog binarnog signala čije su moguće vrijednosti značajnog 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 funkcionise tako što postavlja 3 vrijednosti praga (u opštem slučaju M -arnog signala postavljaju se $M-1$ vrijednosti praga), po jedan na sredini između svake dvije susjedne vrijednosti.

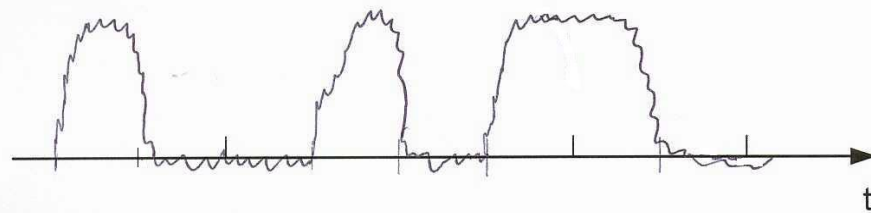




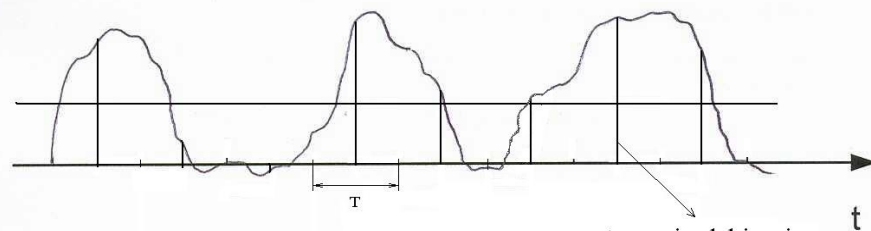
Signal na izlazu iz predajnog pretvarača-digitalni signal.



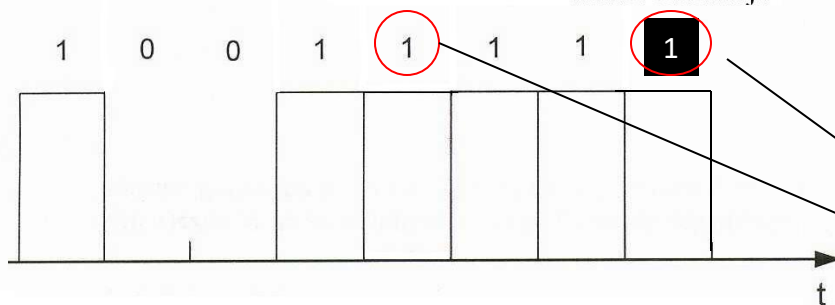
Prolaskom kroz predajni filter dolazi do izobličenja signala



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.

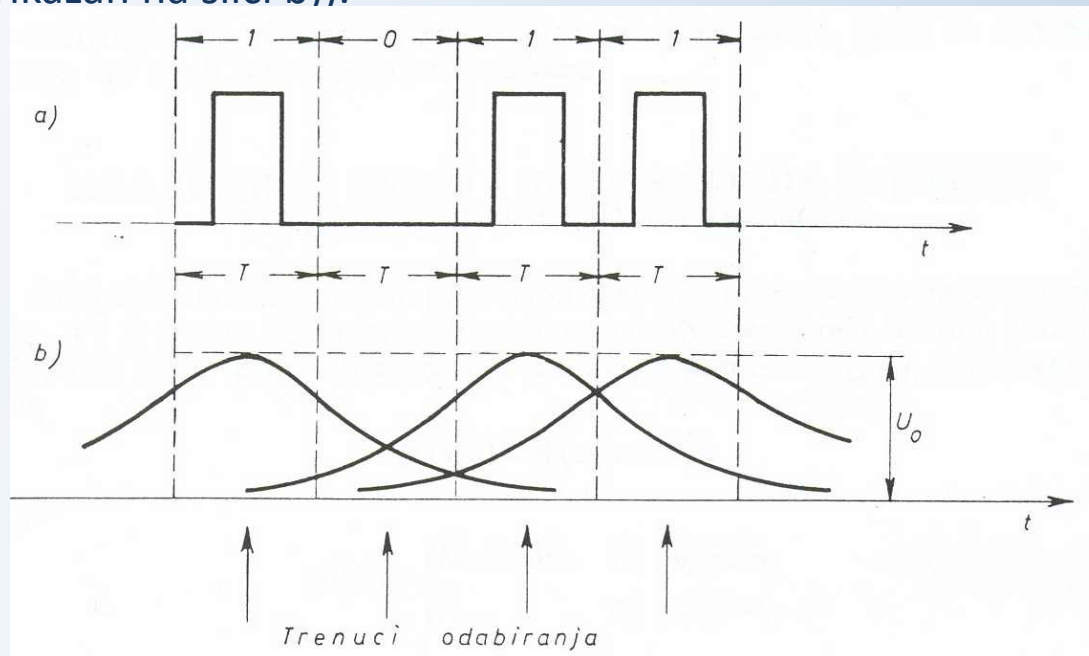
U osnovi postoje **dva razloga** za pojavu greške:

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)).



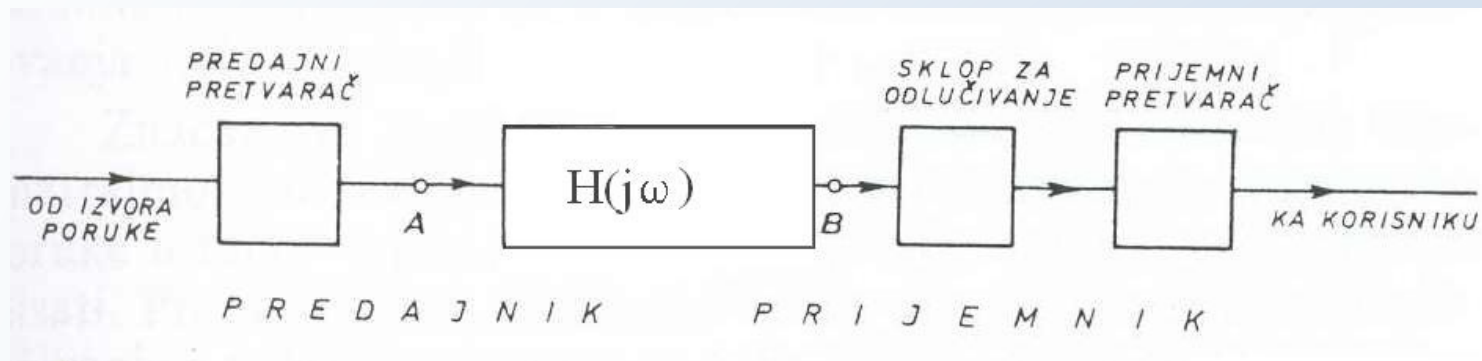
Prijemni odabirač uzima odbirke ovakvog primljenog signala u regularno raspoređenim tačkama odabiranja. Perioda odabiranja je jednaka trajanju jednog signalizacionog intervala T . Intenzitet svakog uzetog odbirka odgovara poslatom znaku odnosno pauzi, ali isto tako se ovoj vrijednosti superponira u posmatranoj 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.

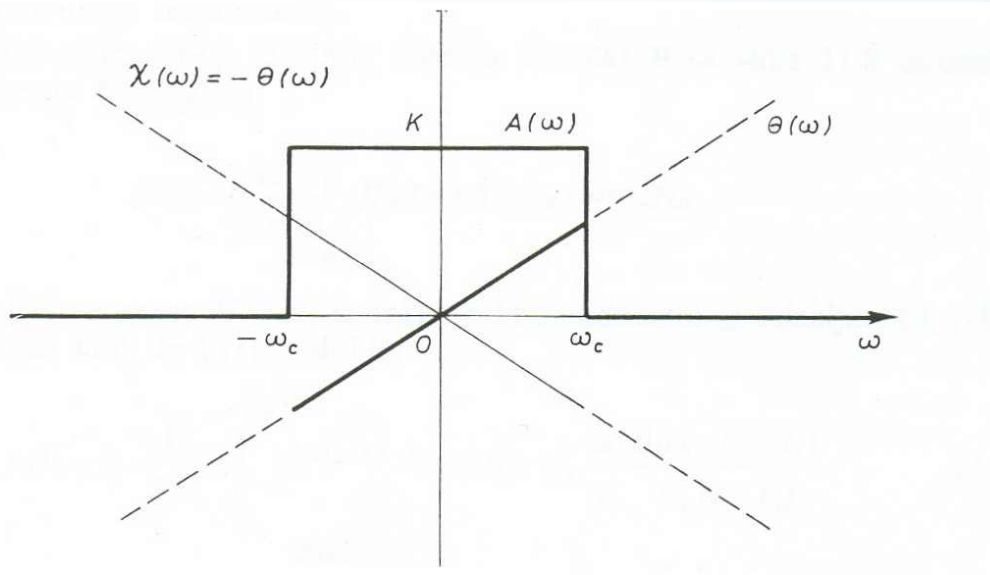
IDEALAN SISTEM I NAČIN KAKO DA SE IZBJEGNE INTERSIMBOLSKA INTERFERENCIJA

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:

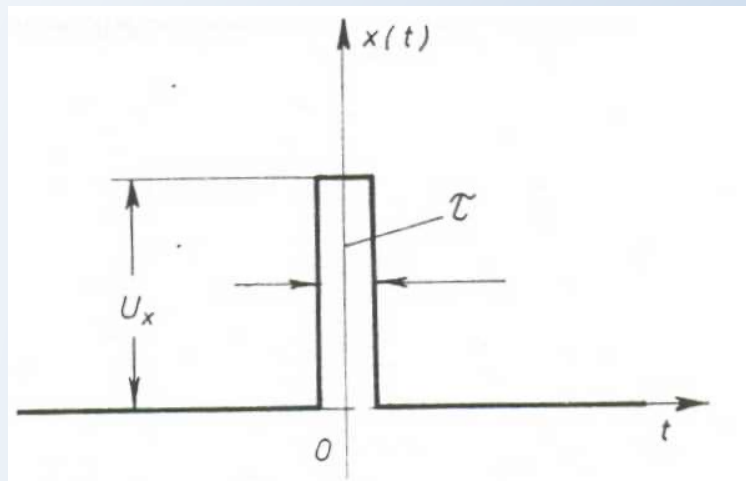
$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)}$$



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

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

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



Fourier-ova transformacija funkcije $x(t)$ koja opisuje ovakav signal je:

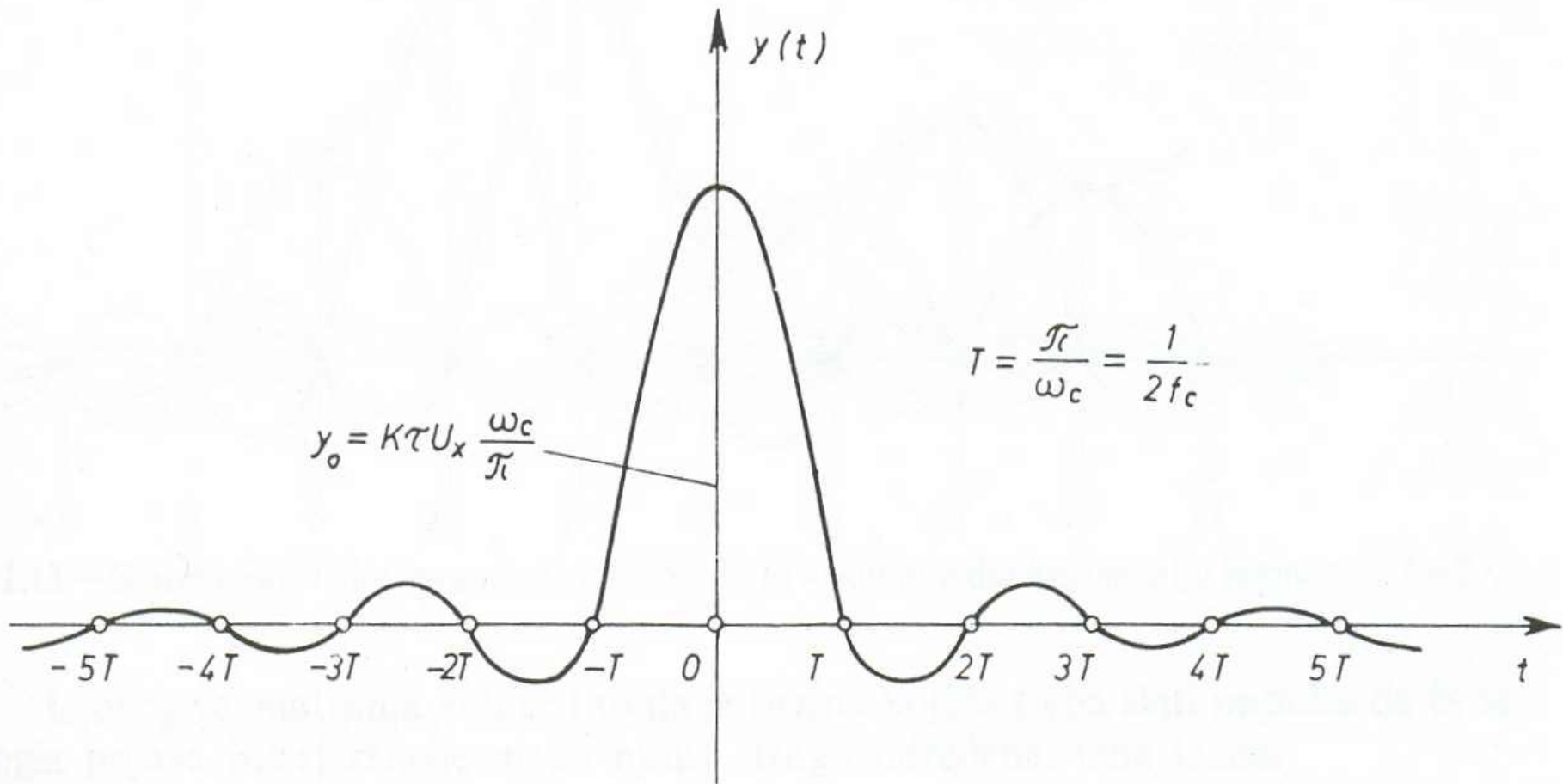
$$X(j\omega) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} U_x e^{-j\omega t} dt \approx \tau U_x$$

Odziv pretpostavljenog idealnog sistema na opisanu pobudu je:

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

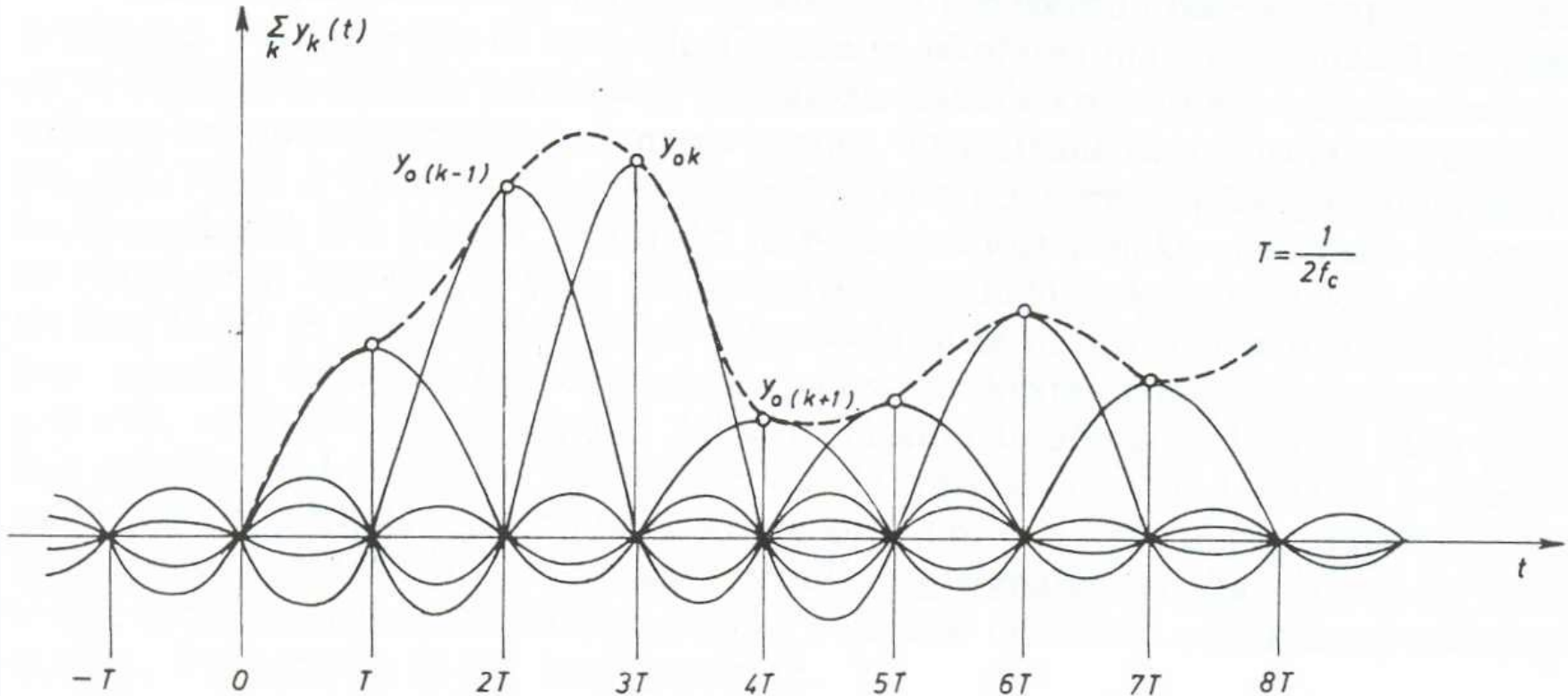
Ako zanemarimo kašnjenje ($t_0=0$), odziv na pobudu usamljenim pravougaonim impulsom je:

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



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 element realizacije praktičnih sistema.