

Elektroničke komunikacije

Predavači: *prof.dr.sc. Borivoj Modlic*
prof.dr.sc. Sonja Grgić
doc.dr.sc. Gordan Šišul

Zavod za radiokomunikacije,
zgrada C, 11. i 12. kat

**Predavanja i ostali materijali o
predmetu dostupni su na:**

<http://www.fer.unizg.hr/predmet/elekom>

Organizacija nastave i ispita

Sadržaj predavanja

- Uvod. Model komunikacijskog sustava. Izvori informacija (zvuk, slika, podaci). Digitalni signali u osnovnom pojasu frekvencija. Smetnje u komunikacijskom kanalu, kapacitet kanala. Značajke prijenosnih medija.
- Osnovni pojmovi o modulaciji. Sistematizacija modulacijskih postupaka. Modulacija amplitude (AM). Modulacija faze (PM), modulacija frekvencije (FM). Demodulacija. Utjecaj šuma.
- Diskretna modulacija amplitude (ASK). Diskretna modulacija frekvencije (FSK), koherentna i nekoherentna demodulacija. Diskretna modulacija faze (PSK). Modulacijski postupci s minimalnim razmakom frekvencija (MSK i GMSK). Kvadratura diskretna modulacija amplitude (QAM). Kvaliteta modulacije. Postupci sinkronizacije i obnove nosioca.

Sadržaj predavanja

- Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca (OFDM). Modulacija impulsnog signala. Modulacija amplitude impulsa (PAM). Modulacija trajanja/širine impulsa (PDM). Modulacija položaja/faze impulsa (PPM). Modulacija frekvencije impulsa (PFM).
- Komunikacijska mreža. Vrste mreža. Mreže s komutacijom kanala i komutacijom paketa. Tehnike multipleksiranja. Komunikacijski protokol. Slojevi mreže. Referentni model OSI. Referentni model TCP/IP.

Sadržaj predavanja

- Javna komutirana telefonska mreža (PSTN). Telefonske modemske veze. Digitalne pretplatničke linije. Asimetrična digitalna pretplatnička linija (ADSL). Optičke pristupne tehnologije.
- Lokalne mreže. Ethernet. Radijske lokalne mreže (WLAN). Bluetooth.
- Mreže širokih područja (WAN) s komutacijom paketa. Protokol X.25. Komutacija okvira. Mreže s asinkronim načinom prijenosa (ATM). Mobilne komunikacije. Čelijski sustavi. Dvosmjerna komunikacija, FDD, TDD. Tehnike višestrukog pristupa: FDMA, TDMA, CDMA. Mreže vrste GSM, UMTS.

Opće kompetencije

- Svrha predmeta je usvajanje temeljnih znanja o prijenosu informacija u različitim komunikacijskim sustavima.
- Student će steći potpuni uvid u analogne i digitalne modulacijske postupke, njihove značajke i načine primjene u implementaciji usluga.
- Student će razumjeti mogućnosti i ograničenja različitih prijenosnih sustava i bit će sposoban provesti odabir parametara modulacijskog postupka za realizaciju pojedine usluge u određenom komunikacijskom sustavu.

Literatura

- B.Modlic, I.Modlic, *Modulacije i modulatori*, Školska knjiga, 1995.
- R.Horak, *Communications Systems and Networks*, Wiley, 2002.
- L.Goleniewski, *Telecommunications Essentials*, Addison-Wesley, 2001.
- R. E. Ziemer, W. H. Tranter, *Principles of Communications*, Wiley, 2008.
- A.Leon-Garcia, I.Widjaja, *Communication Networks: Fundamentals Concepts and Key Architectures*, McGraw-Hill, 2004.
- J. G. Proakis, M. Salehi, *Fundamentals of Communication Systems*, Prentice Hall, 2005.

Sadržaj laboratorijskih vježbi

Popis laboratorijskih vježbi

- Vježba 1. Modulacija amplitude (AM)
- Vježba 2. Diskretna modulacija faze (PSK), optimalni prijamnik
- Vježba 3. Modulacijski postupak s minimalnim razmakom frekvencija (GMSK)
- Vježba 4. Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca (OFDM)
- Vježba 5. Nesimetrična digitalna pretplatnička linija (ADSL)

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Kontinuirana provjera znanja kroz semestar

- laboratorijske vježbe + međuispit + završni ispit

Ispitni rok

- laboratorijske vježbe + ispit

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Laboratorijske vježbe

- laboratorijske vježbe održavat će se na 12. katu zgrade C u turnusu koji je protivan turnusu predavanja
- na laboratorijske vježbe je potrebno doći:
 - pripremljen (proučiti upute za odgovarajuću vježbu)
 - s napisanom domaćom zadaćom
- domaća zadaća zadana je u uputama za pojedinu vježbu i sastoji se od dva zadatka ili pitanja koje je potrebno riješiti odnosno odgovoriti u pisanom obliku
- tijekom vježbi, asistenti će pregledati domaće zadaće

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Laboratorijske vježbe

- nakon što obradi pojedinu vježbu, svaki student treba kolokvirati vježbu
- kolokvij pokriva gradivo koje je vezano uz upute za dotičnu vježbu, domaću zadaću za tu vježbu te rad i rezultate dobivene na vježbi
- na pojedinoj laboratorijskoj vježbi može se postići 0 - 2 boda
- ukupan broj bodova koje se može ostvariti putem laboratorijskih vježbi je 10
- izostanak s pojedine vježbe donosi jedan negativan bod (-1)

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Međuispit

- međuispit se sastoji od pitanja
- točan odgovor na pitanje donosi od 1 - 10 bodova
- ukupan broj bodova koje se može ostvariti na međuispitu je 39 bodova
- međuispit traje 90 minuta

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Završni ispit

- završni se ispit sastoji se od pitanja
- točan odgovor na pitanje donosi od 1 - 10 bodova
- ukupan broj bodova koje se može ostvariti na završnom ispitu je 51 bod
- završni ispit traje 120 minuta

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Ispitni rok

- Ispitni rok sastoji se od pitanja
- točan odgovor na pitanje donosi od 1 - 10 bodova
- ukupan broj bodova koje se može ostvariti na ispitu je 90 bodova
- ispit traje 180 minuta

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Ukupni broj bodova za kontinuiranu provjeru znanja

- Međuispit - do 39 bodova
- Završni ispit - do 51 bod
- Laboratorijske vježbe - do 10 bodova (5 vježbi + domaće zadaće)
- Ukupni broj bodova - do 100 bodova
- Student je položio ispit ako je ukupno ostvario **50** ili više bodova
 - Ocjenjivanje se provodi u skladu sa sljedećom tablicom

X - broj bodova	Ocjena
$100 \leq X \leq 90$	5
$90 < X \leq 76$	4
$76 < X \leq 62$	3
$62 < X \leq 50$	2
$X < 50$	1

Kako položiti ispit iz Elektroničkih komunikacija?

Ukupni broj bodova za ispitni rok

- Laboratorijske vježbe - do 10 bodova (5 vježbi + domaće zadaće)
- Pismeni ispit – do 90 bodova
- Ukupni broj bodova - do **100** bodova
- Student je položio ispit ako je ukupno ostvario **50** ili više bodova
 - Ocjenjivanje se provodi u skladu sa sljedećom tablicom

X - broj bodova	Ocjena
$100 \leq X \leq 90$	5
$90 < X \leq 76$	4
$76 < X \leq 62$	3
$62 < X \leq 50$	2
$X < 50$	1

Uvod

Što je komunikacija?

- komunikacija je prijenos informacije
 - različiti oblici informacija
 - poštansko pismo, elektroničko pismo, govor, glazba, slika, ...
 - različiti mediji za prijenos informacija
 - olovka i papir, dimni signali, bakrena parica, elektromagnetski val, koaksijalni kabel, svjetlovod, ...
 - različito kašnjenje u prijenosu informacija
 - npr. kratko pismo može biti dostavljeno u nekoliko sekundi ili minuta putem elektroničke pošte, za dan ili dva žurnom poštanskom uslugom ili za tjedan dana običnom poštanskom uslugom
 - različita kvaliteta prijenosa informacija
 - npr. govor i glazba mogu biti raspoloživi u vrhunskoj CD-kvaliteti, uobičajenoj kvaliteti radijskih programa, telefonskoj kvaliteti ili vrlo niskoj kvaliteti npr. radijski uređaji u taksiju, tramvaju i sl.
- inženjeri vrednuju sve navedene parametre

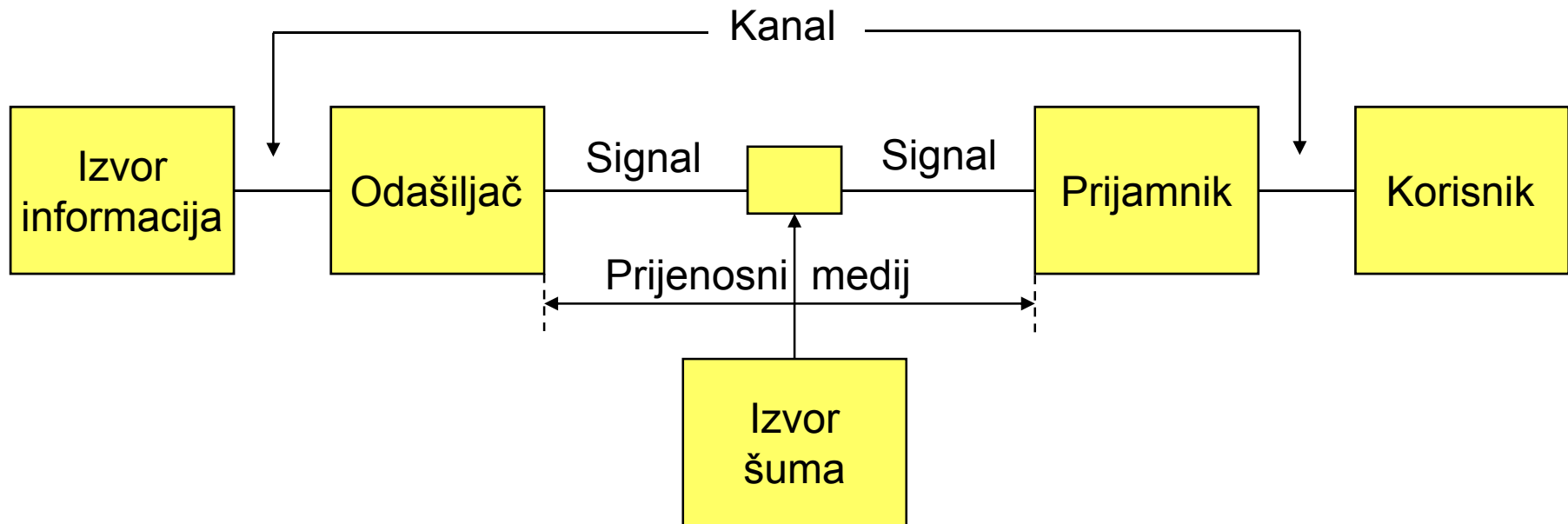
Što je informacija?

- u filozofiji i matematici postoji više odgovara na to pitanje
 - informacija je podatak
 - npr. stanje bankovnog računa, telefonski broj, datoteka na računalu, ...
 - podatak u najužem smislu je predodčen slijedom binarnih simbola
 - informacija je smisao, značenje (*meaning*)
 - npr. značenje stanja bankovnog računa može biti da je stanje na njemu nedopušteni minus i da će račun biti zatvoren, značenje datoteke na računalu može biti da smo dobitnici na lutriji ili da smo dobili otkaz
 - informacija je podatak + smisao

Model komunikacijskog sustava

Što je komunikacijski sustav?

- sustav koji omogućava prijenos informacije između prostorno udaljenih točaka
- opći model komunikacijskog sustava



Opći model

- izvor informacija
 - osoba, objekt, uređaj i sl. koji generiraju informaciju koju treba prenijeti korisniku
 - informacija se može pojaviti u obliku pisane ili izgovorene riječi, glazbe, slike, nekih podataka i sl.
 - informacija može biti predstavljena kao slijed diskretnih elemenata, kao što su slova, brojevi, note i sl., koji se nazivaju simboli, ili kao funkcija jedne ili više varijabli
 - npr. u telefonskom prijenosu informacija je predstavljena kao funkcija vremena, u televiziji kao funkcija vremena i dviju prostornih koordinata, itd.
 - prijenosni sustav mora osigurati zadovoljavajuće uvjete prijenosa za bilo koju od mogućih poruka

Opći model

- odašiljač
 - provodi pretvorbu informacije u signal pogodan za prijenos
 - signal = električni ekvivalent informacije koja se prenosi
 - npr. u telefoniji se zvučni tlak prevara u električnu struju, u televiziji se raspored svjetlosnih jakosti, koje predstavljaju sliku, prevara u električni napon
- prijenosni medij
 - sredstvo kroz koje se signal prenosi od odašiljača do prijamnika
 - vođeni mediji - upletena parica, koaksijalni kabel, svjetlovod
 - nevođeni medij - slobodni prostor u kome se prenosi elektromagnetski val
 - pojave koje se ovdje događaju mogu promijeniti valni oblik električnog signala te dovesti do degradacije parametara cijelog sustava
 - npr. kod prijenosa zvuka čuje se pucketanje, u televizijskoj slici se vidi "snijeg" ili je slika dvostruka
 - ove pojave uzrokovane su šumom (izvor šuma je sastavni dio blok-sheme koja prikazuje opći model komunikacijskog sustava)

Opći model

- izvor šuma
 - pojave vezane uz šum su stohastičke prirode
 - zbog djelovanja šuma primljeni signal nije jednoznačno određen odaslanim signalom
- prijamnik
 - provodi pretvorbu primljenog električnog signala u informaciju
- korisnik
 - osoba, uređaj ili objekt kome je informacija namijenjena
- opći model komunikacijskog sustava se može primijeniti i na prijenos informacije putem električnog signala kao i na ostale komunikacijske sustave
 - npr. kad jedan čovjek govori drugome onda je mozak prvog čovjeka izvor informacije, a njegov govorni sustav odašiljač; prijenosni medij je prostor kroz koji se prenosi zvučni tlak; prijamnik je uho i sustav živaca drugog čovjeka, a korisnik je mozak toga drugog čovjeka

Točnost reprodukcije informacije

- komunikacijski sustav treba omogućiti da se "izlaz" iz izvora informacija reproducira na mjestu koje odgovara korisniku
- pri tome se postavlja pitanje točnosti reprodukcije (Da li reprodukcija mora biti savršena ili ne?)
- razmatrajući primjere iz svakodnevnog života uviđamo da je komunikacija zadovoljavajuća iako reprodukcija nije savršena
- npr. za televizijsku sliku kažemo da je izvrsna iako znamo da nije onakva kao kad gledamo "živu" scenu; kod prijenosa govora u telefoniji zadovoljavajuća je primljena poruka iako ona nije u potpunosti istovjetna odaslanoj (izgovorenoj na odašiljačkoj strani)
- *korisnik* određuje da li je reprodukcija informacije zadovoljavajuća i prihvatljiva

Definiranje mjerne jedinice decibel

Razina snage signala u decibelima (dB)

- Decibelima se izražava omjer npr. snaga, napona, struje i sl.
- Omjer snaga izražen u decibelima dobiva se kao:

$$\frac{P_2}{P_1} [\text{dB}] = 10 \log \frac{P_2 [\text{W}]}{P_1 [\text{W}]}.$$

- Ako se umjesto P_1 stavi neka referentna razina, npr. 1 W ili 1 mW, dobit će se snaga u jedinici koja se označuje dBW odnosno dBm, a što znači: decibela iznad 1 W odnosno decibela iznad 1 mW:

$$P[\text{dBW}] = 10 \log \frac{P[\text{W}]}{1 \text{ W}}; \quad P[\text{dBm}] = 10 \log \frac{P[\text{mW}]}{1 \text{ mW}}.$$

- Ovi izrazi poslužit će za pretvorbu snage izražene u vatima u snagu izraženu u dBW odnosno u dBm.

Razina snage signala u decibelima (dB)

- Snaga signala izražena u dBW ili u dBm može se pretvoriti u snagu izraženu u vatima pomoću inverznih izraza,

$$P[\text{W}] = 10^{\frac{P[\text{dBW}]}{10}} ;$$

$$P[\text{mW}] = 10^{\frac{P[\text{dBm}]}{10}} ;$$

$$P[\text{W}] = 10^{-3} \cdot 10^{\frac{P[\text{dBm}]}{10}} .$$

- Kako je,

$$P[\text{mW}] = P[\text{W}] \cdot 1000$$

onda izlazi,

$$P[\text{dBm}] = P[\text{dBW}] + 30 ,$$

odnosno,

$$P[\text{dBW}] = P[\text{dBm}] - 30 .$$

Razina snage signala u decibelima (dB)

- Primjeri:

0,1 W	↔	-10 dBW	=	20 dBm
0,25 W	↔	-6 dBW	=	24 dBm
0,5 W	↔	-3 dBW	=	27 dBm
1 W	↔	0 dBW	=	30 dBm
2 W	↔	3 dBW	=	33 dBm
4 W	↔	6 dBW	=	36 dBm
5 W	↔	7 dBW	=	37 dBm
8 W	↔	9 dBW	=	39 dBm
10 W	↔	10 dBW	=	40 dBm
25 W	↔	14 dBW	=	44 dBm
40 W	↔	16 dBW	=	46 dBm
100 W	↔	20 dBW	=	50 dBm
200 W	↔	23 dBW	=	53 dBm
1000 W	↔	30 dBW	=	60 dBm

Izvori informacija i oblici signala

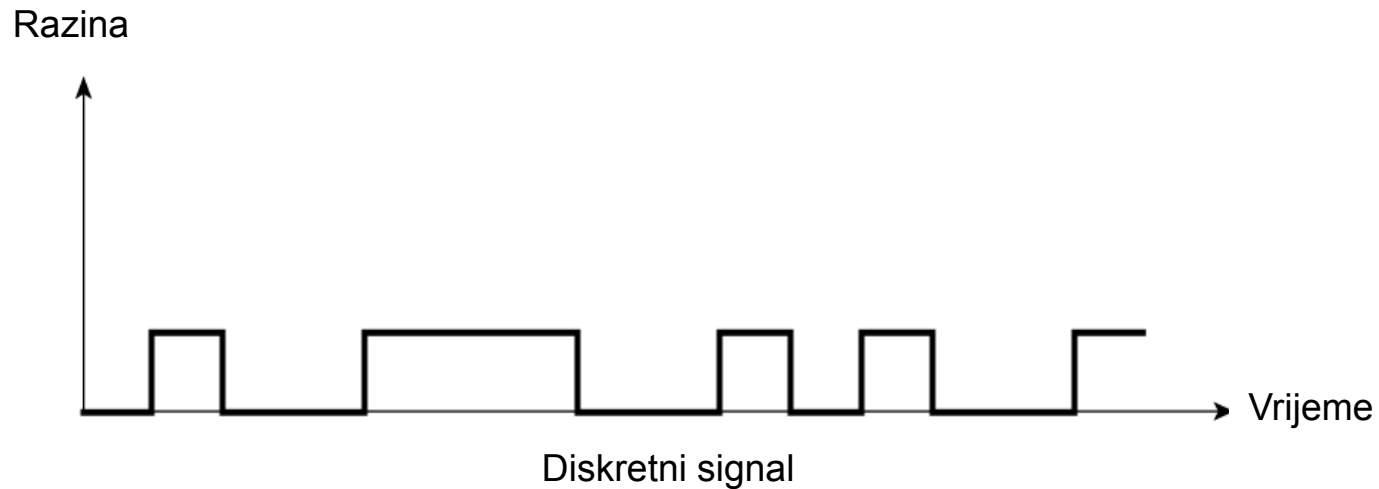
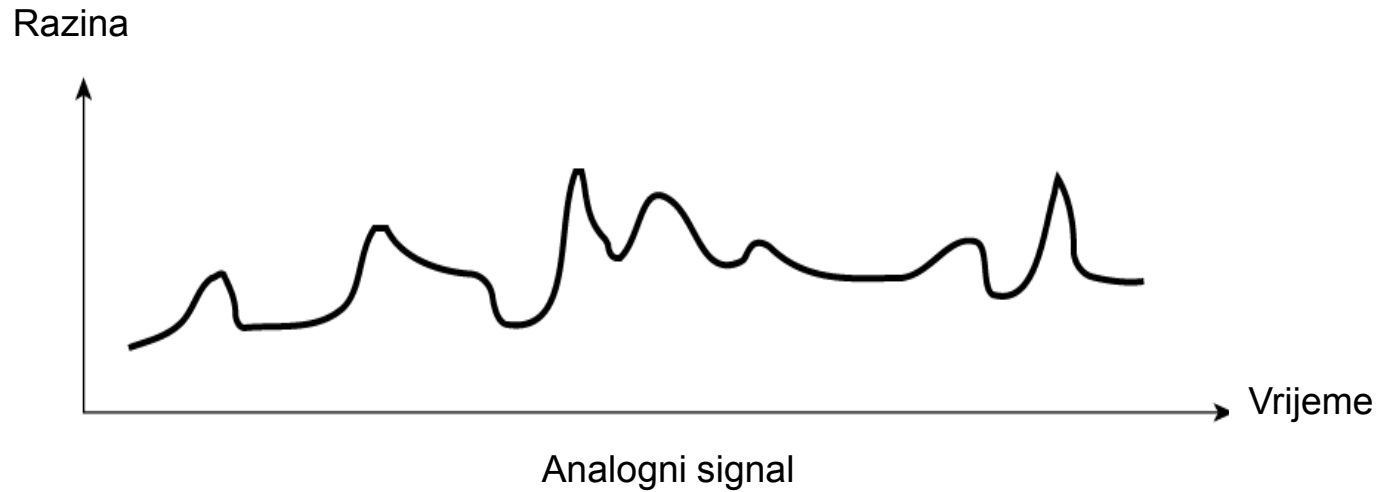
Oblici izvora informacije

- izvori analogne informacije
 - kontinuirano generiraju vrijednosti u nekom vremenskom intervalu
 - takve informacije su govor odnosno zvuk, slika i sl.
- izvori digitalne informacije
 - generiraju diskretne vrijednosti
 - takve informacije su tekst, brojevi, i sl.
- za prijenos analogne informacije mogu se rabiti i analogni i digitalni signali, a isto vrijedi i za prijenos digitalne informacije
 - moguće je rabiti analogni signal za prijenos digitalne informacije
 - npr. faks, modemi za povezivanje računala putem telefonske mreže
 - moguće je rabiti digitalni signal za prijenos analogne informacije
 - npr. audio CD (*Compact Disc*), DVD, MP3

Oblici signala

- signal predstavlja električni ili elektromagnetski prikaz informacije
- razmatranje signala u vremenskom području
 - analogni signal
 - kontinuirana promjena razine u vremenu
 - diskretni signal
 - vremenska promjena razine samo između određenih diskretnih vrijednosti

Analogni i diskretni signal

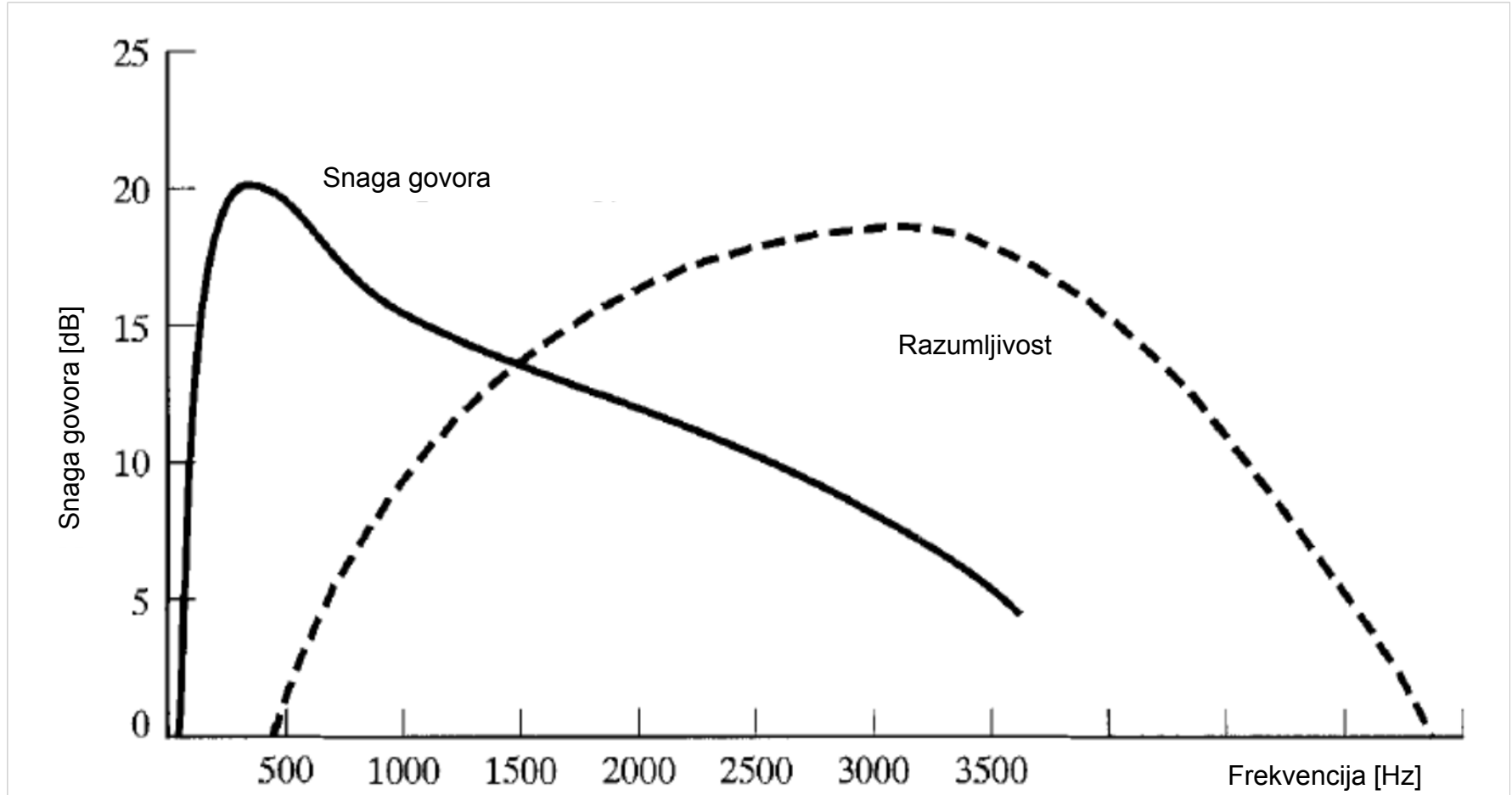


Signali govora i glazbe (audiosignali)

- ljudski slušni sustav je osjetljiv na frekvencijsko područje od 20 Hz do 20 kHz
- govor zauzima frekvencijsko područje od 100 Hz do 7 kHz
 - spektralna gustoća snage govora je veća u području niskih frekvencija
 - u frekvencijskom području do 1 kHz sadržano je prosječno više od 80% snage govora
 - za razumljivost govora je važno i područje viših frekvencija
 - ako se prenose frekvencije iznad 1 kHz razumljivost govora je prosječno veća od 85%
 - ako se prenose frekvencije do 1 kHz razumljivost govora je oko 40%

Signali govora i glazbe (audiosignali)

- ovisnost snage i razumljivosti govora



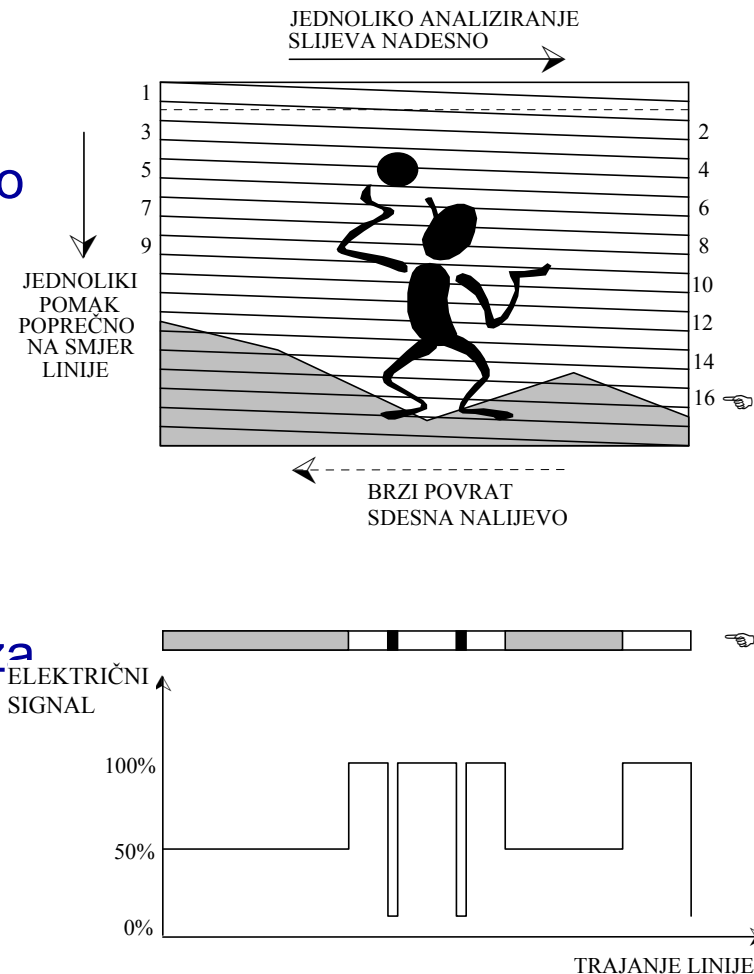
Signali govora i glazbe (audiosignali)



- u telefonskom sustavu je širina pojasa signala govora ograničena na područje od 300 Hz do 3400 Hz, a zahtijevani odnos S/N je 30 – 40 dB
 - kompromis između dovoljne snage i razumljivosti govora
- u reprodukciji glazbe CD kvalitete rabi se frekvencijsko područje do 22 kHz, a zahtijevani odnos S/N je 90 dB
- za FM radijske programe frekvencijski pojas svakog od dva stereofonska kanala prostire se od 40 – 15 000 Hz

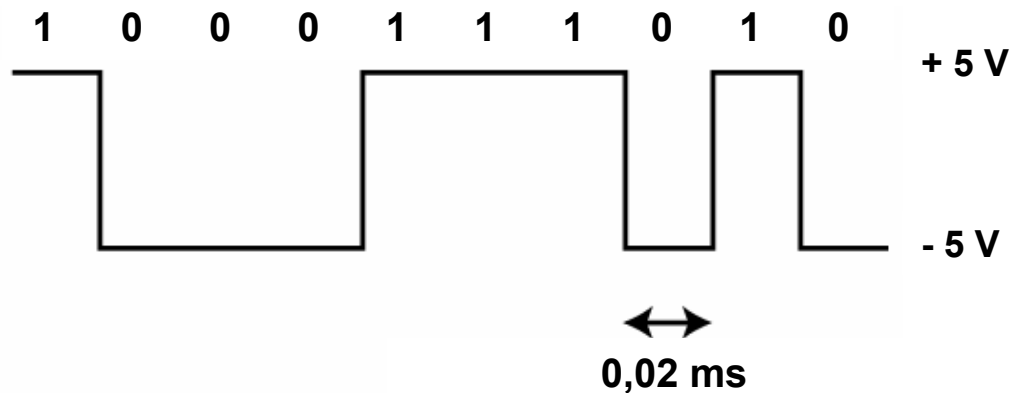
Signal slike (videosignal)

- videosignal nastaje u kameri gdje se provodi pretvorba optičke slike u električni signal
- optička slika se analizira po linijama u točno određenom rasporedu
- analiziranje u horizontalnom smjeru se provodi u ritmu horizontalne frekvencije f_H
- povećanjem broja linija raste kvaliteta slike ali raste i cijena prijenosnog sustava jer je potrebna veća frekvencijska širina pojasa za prijenos videosignala
- u televiziji standardne kvalitete koristi se 625 linija, a širina pojasa videosignala iznosi 5 MHz



Signali podataka

- generiraju ih uglavnom računala
- informacija je diskretnog karaktera, a oblikuje se uz pomoć simbola iz konačnog skupa simbola
 - najčešće se rabi binarni kod u kome se kombiniraju dva stanja: 1 i 0
 - brzina prijenosa je određena trajanjem bita
- simboli se transformiraju u signale čiji je valni oblik definiran npr. s dvije naponske razine (jedna odgovara znaku "1", a druga znaku "0")



Brzina prijenosa = 50 kbit/s

Signali podataka

- npr. tekst kao oblik informacije u diskretnom obliku nije pogodan za pohranjivanje na računalu ili prijenos u komunikacijskim sustavima
 - slova i znakovi se prikazuju kao simboli sastavljeni od određenog broja bita
 - najčešće korišten kod je ASCII kod (*American Standard Code for Information Interchange*)
 - svako slovo ili znak se prikazuje jedinstvenom kodnom kombinacijom sastavljenom od 7 bita
 - moguće je prikazati 128 slova i znakova što je puno više od potrebnog broja slova i znakova
 - određene kodne kombinacije se rabe kao kontrolni znakovi i obavljaju specifične funkcije
 - ASCII kodirana slova i znakovi se pohranjuju u obliku kodne riječi sastavljene od 8 bita (8 bita = 1 bajt ili 1 oktet)
 - osmi bit je tzv. paritetni bit koji se rabi za detekciju pogreške
 - paritetni bit se postavlja tako da ukupan broj jedinica u svakom bajtu bude uvijek paran ili uvijek neparan ovisno o sustavu

Položaj bita

				0	0	0	0	1	1	1	1			
				0	0	1	1	0	0	1	1			
				0	1	0	1	0	1	0	1			
b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁								
0	0	0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p
0	0	0	0	1	0	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0	0	1	0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0	0	1	1	0	1	1	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0	1	0	0	0	0	0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0	1	0	1	0	1	1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0	1	0	0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0	1	1	1	1	1	1	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1	0	0	0	0	0	0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1	0	0	1	0	1	1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	1	0	0	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1	0	1	1	1	1	1	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1	1	0	0	0	0	0	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1	1	0	1	0	1	1	CR	GS	-	=	M	]	m	}
1	1	1	0	1	0	0	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1	1	1	1	1	1	1	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

l version of

phabet Number 5 (T.50).

This is the U.S. national version of

CCITT International Alphabet Number 5 (T.50).

Informacija i signal

- pretvorba informacije u analogni signal

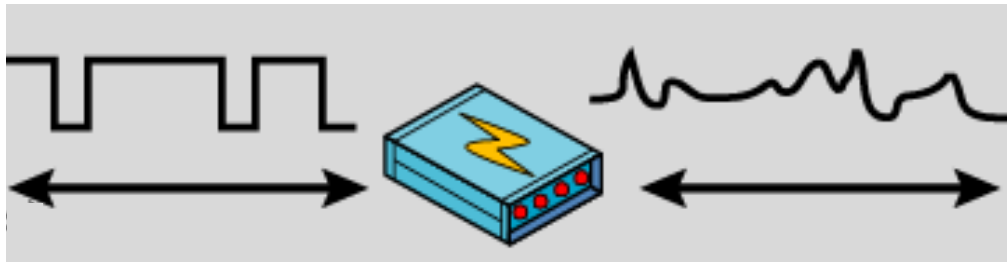
Analogna
informacija:
govorni
zvučni val



Telefon

Analogni
signal

Digitalna
informacija:
binarni
naponski
impulsi

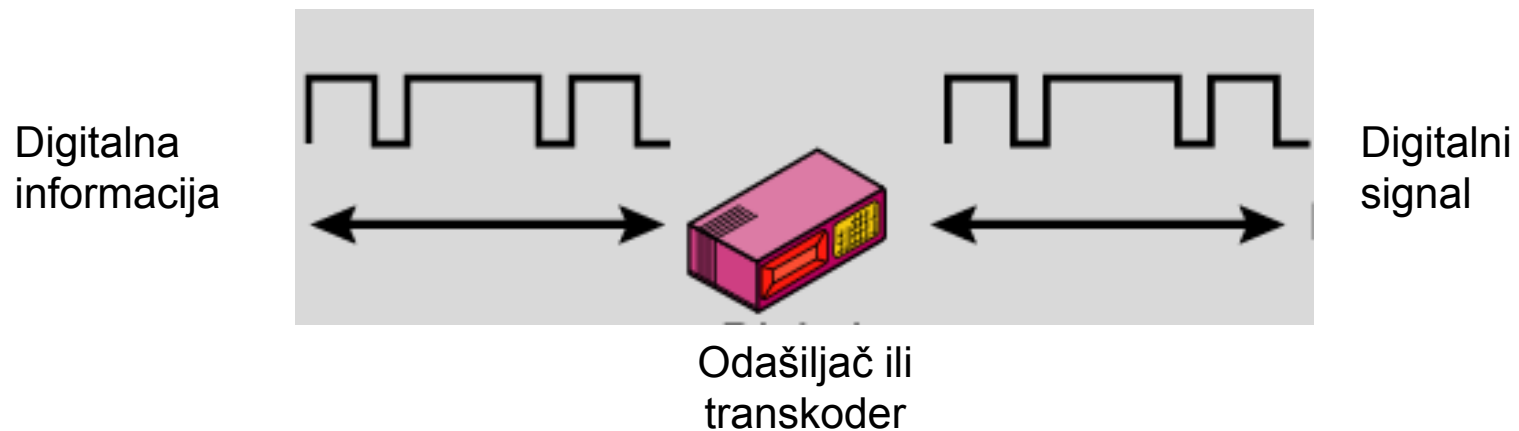
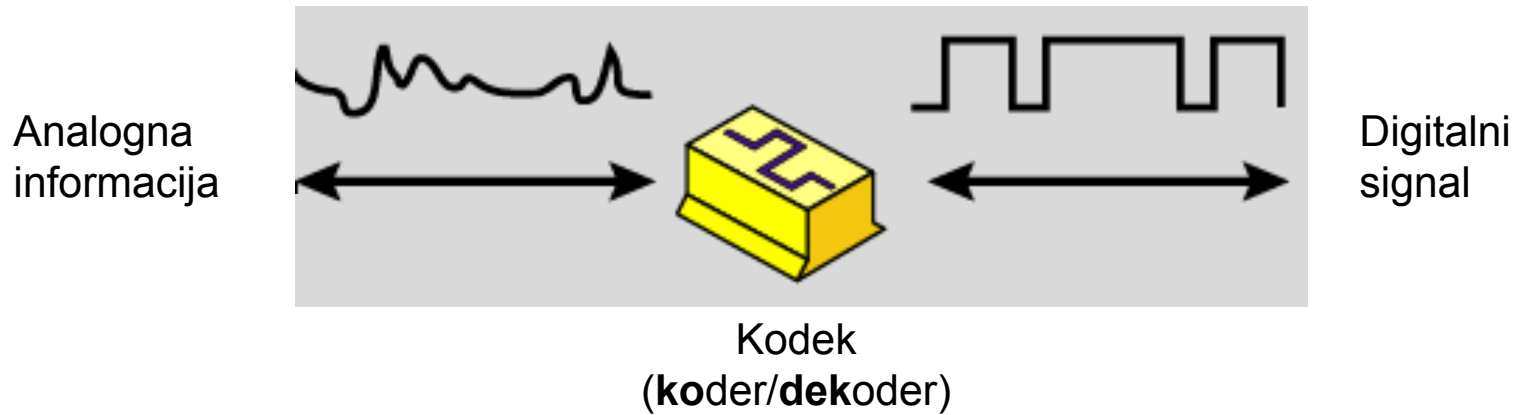


Modem
(**m**odulator/**d**emodulator)

Analogni
signal

Informacija i signal

- pretvorba informacije u digitalni signal



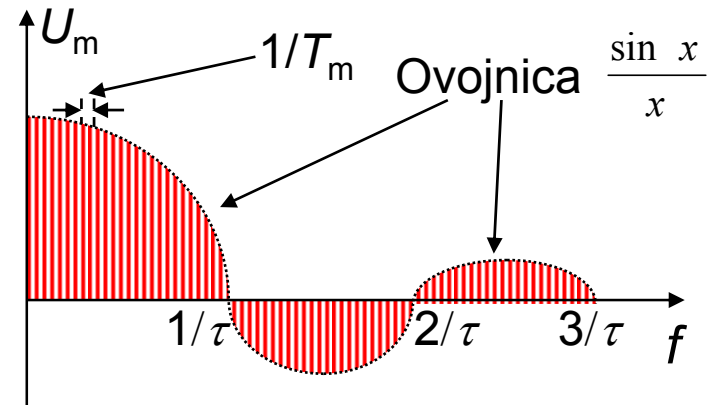
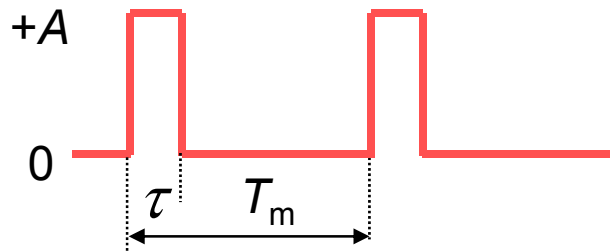
Informacija i signal

	Analogni signal	Digitalni signal
Analogna informacija	Dvije mogućnosti za prijenos: (a) signal zauzima isto frekvencijsko područje kao analogna informacija, (b) analogna informacija je kodirana radi prebacivanja u drugo frekvencijsko područje.	Analogna informacija je kodirana uporabom kodeka, kako bi bila preoblikovana u digitalni signal.
Digitalna informacija	Digitalna informacija je kodirana uporabom modema, kako bi bila preoblikovana u analogni signal.	Dvije mogućnosti za prijenos: (a) signal zauzima dvije naponske razine za prikaz binarnih podataka digitalne informacije, (b) digitalna informacija je kodirana radi dobivanja digitalnog signala željenih značajki.

Digitalni signali u osnovnom pojasu frekvencija

Obilježja digitalnih signala

- Digitalna informacija, u pravilu binarna digitalna informacija, predložena je slijedom binarnih znakova «0» i «1».
- Valni oblik digitalnoga električkog signala sastoji se u osnovi od pravokutnih impulsa.
- Spektar periodičnoga pravokutnog signala dobiva se razvojem odgovarajuće funkcije u Fourierov red,

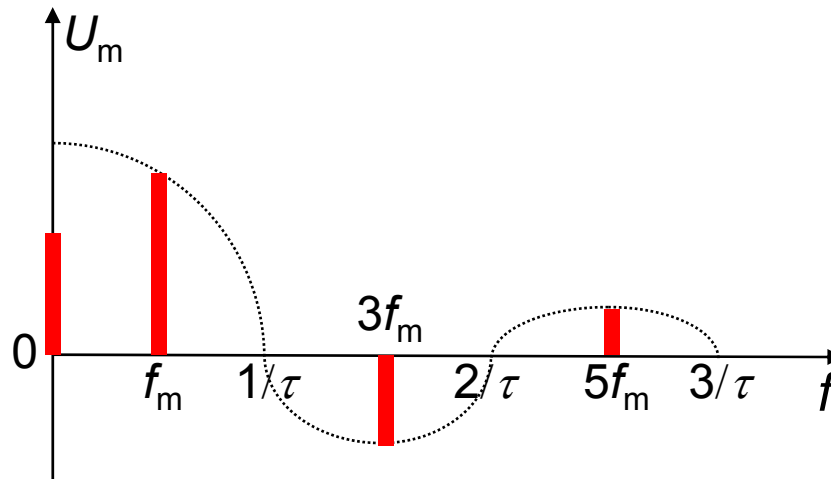
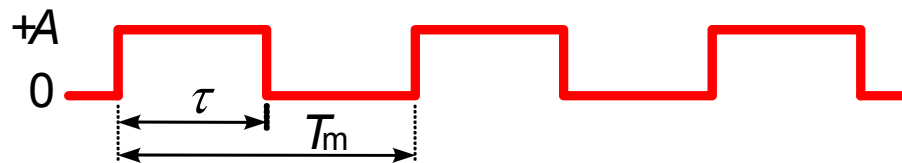


$$u_m(t) = \frac{A\tau}{T_m} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau}{T_m} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi\tau}{T_m}}{\frac{n\pi\tau}{T_m}} \cdot \cos n \frac{2\pi t}{T_m}.$$

Obilježja digitalnih signala

- Kad je trajanje impulsa jednako polovici periode signala ($\tau = T_m/2$), izlazi,

$$u_m(t) = A \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \frac{2\pi t}{T_m} - \frac{2}{3\pi} \cos 3 \frac{2\pi t}{T_m} + \frac{2}{5\pi} \cos 5 \frac{2\pi t}{T_m} - \dots \right).$$



Linijski kodovi, formati digitalnih signala

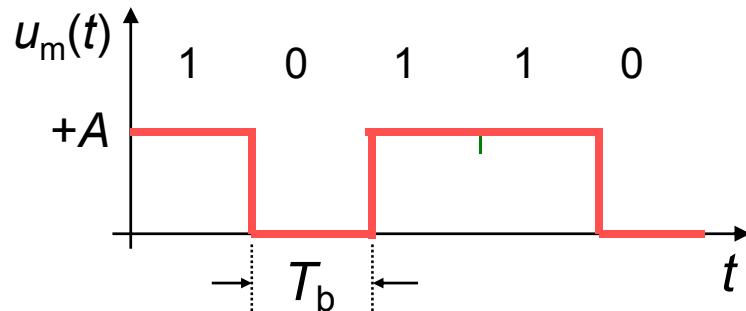
- *Linijski kodovi* → prikazi binarnih znakova električkim signalom — *formati digitalnih signala*.
- Među velikim brojem različitih linijskih kodova valja odabrati onaj koji je najprikladnijih osobina za primjenu u konkretnom slučaju.
- Parametri o kojima ovisi odabir linijskog koda:
 - *Spektralna obilježja signala* trebaju biti prikladna za korišteni prijenosni kanal.
 - *Sinkronizacija digitalnih znakova* obično se obavlja uz pomoć sinkronizacijskih impulsa koji se regeneriraju iz primljenoga slijeda digitalnog signala.
 - *Širina zauzetog pojasa frekvencija* mora biti što manja. Ona se može smanjiti dodatnim filtriranjem ili uporabom linijskog koda s više razina signala.
 - *Niska vjerojatnost pogreške bita* koje nastaju zbog smetnji među dijelovima signala i djelovanja šuma.
 - *Sposobnost otkrivanja nastalih pogrešaka* osobitost je nekih linijskih kodova.
 - *Kompleksnost odgovarajućega elektroničkog sklopovlja i uređaja* ima veliki utjecaj na odabir linijskog koda.
- Sva ta obilježja nisu od jednake važnosti za svaku primjenu.

Linijski kodovi

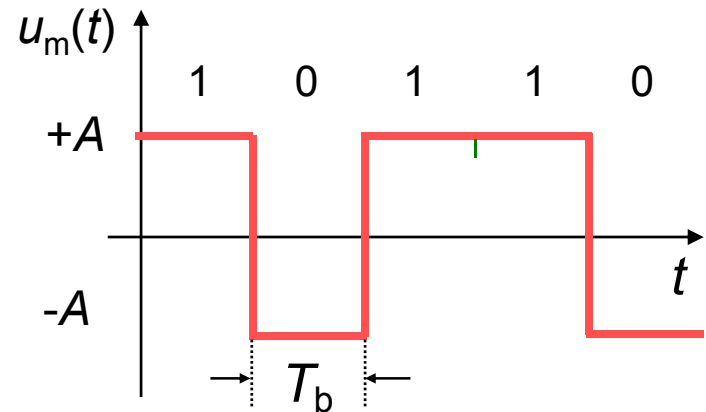
- Linijski kodovi odnosno formati digitalnih signala dijele se u dvije skupine koje se razlikuju po načinu pridruživanja binarnih znakova električnom signalu:
 - binarni znak je pridružen razini električnog signala,
 - binarni znak je pridružen promjeni razine električnog signala.
- Binarni se linijski kodovi sastoje od dva simbola:
 - električnog signala $s_0(t)$, koji se pridružuje znaku «0» i,
 - električnog signala $s_1(t)$, koji se pridružuje znaku «1».
- M -arni linijski kodovi sadrže M različitih simbola.

Primjeri binarnih linijskih kodova

- *NRZ-kod* (NRZ, *Non Return to Zero*) prirodni je način prikazivanja binarnih znakova.
 - Znak «0» predodčen je niskom razinom pravokutnog signala u cijelom intervalu znaka.
 - Znak «1» predodčen je visokom razinom pravokutnog signala u cijelom intervalu znaka.



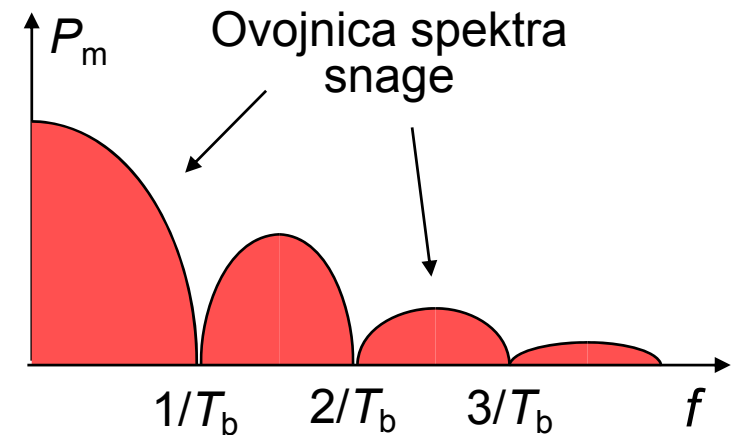
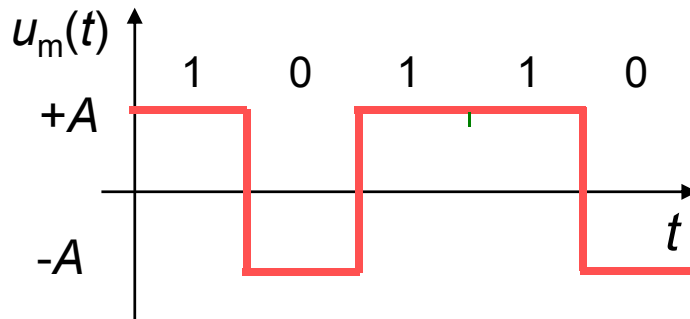
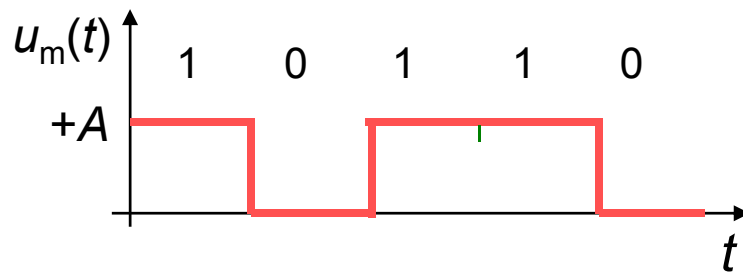
Unipolarni oblik NRZ-koda



Bipolarni oblik NRZ-koda

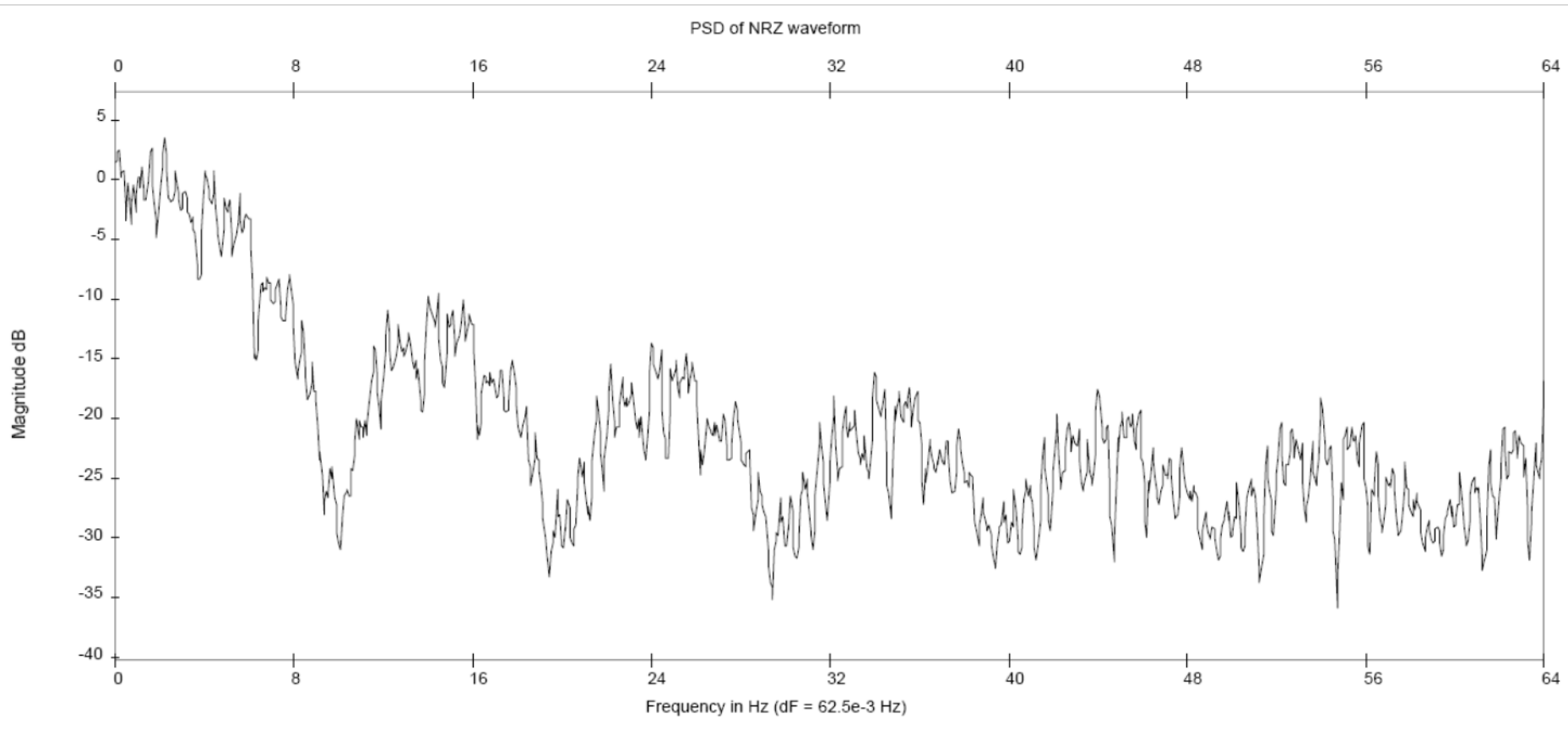
Primjeri binarnih linijskih kodova

- NRZ-kod (*nastavak*).
 - NRZ-signal sadrži istosmjernu komponentu. Ona se može smanjiti uporabom bipolarnog oblika signala.
 - Postoje problemi oko sinkronizacije kad se javlja duži slijed znakova iste vrste. Potrebni su posebni taktni impulsi.



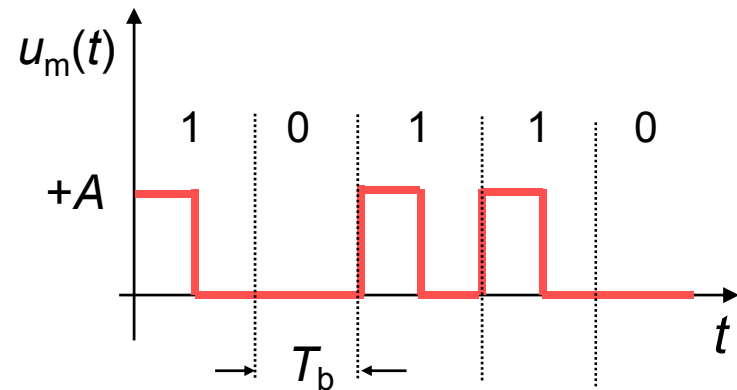
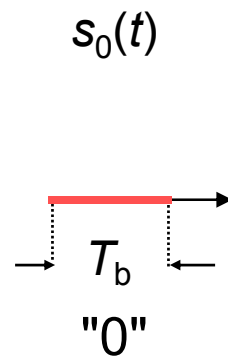
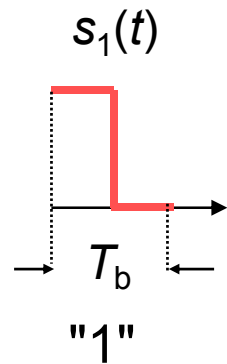
Primjeri binarnih linijskih kodova

- NRZ-kod (*nastavak*).



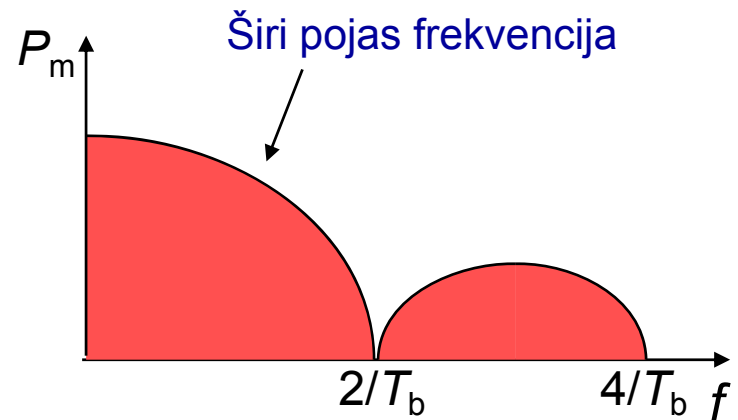
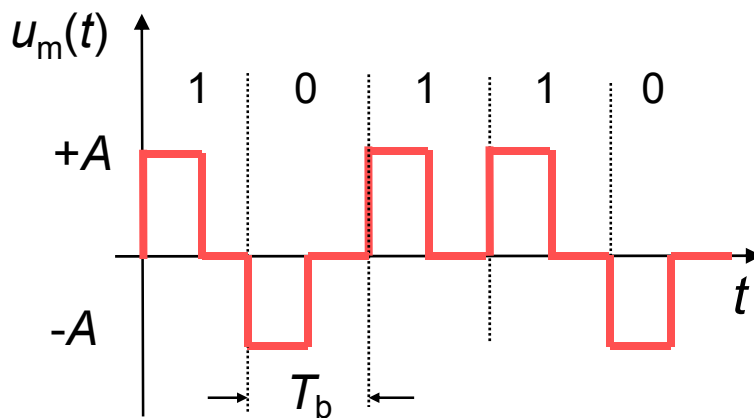
Primjeri binarnih linijskih kodova

- *RZ-kod* (RZ, *Return to Zero*) olakšava problem sinkronizacije.
 - Unipolarni RZ-kod:
 - Znak «1» predodčen je visokom razinom pravokutnog signala u prvoj polovici intervala znaka «1», dok se u drugoj polovici tog intervala vraća na nisku razinu odnosno na razinu nula.
 - Znak «0» predodčen je niskom razinom, odnosno razinom nula u cijelom intervalu tog znaka.



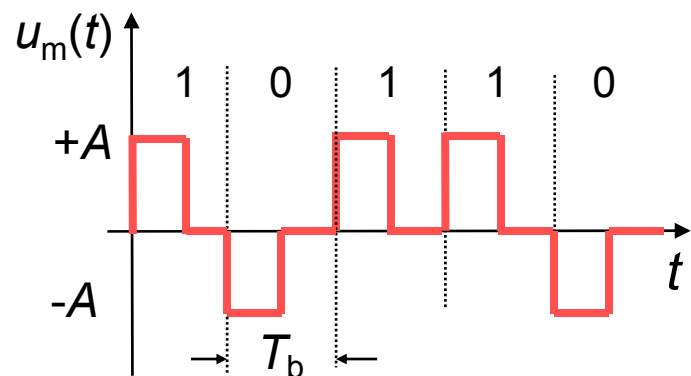
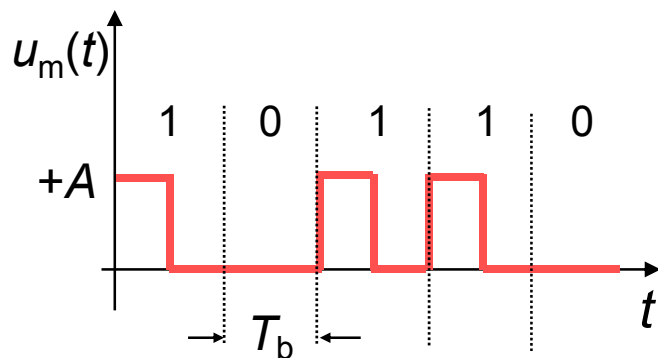
Primjeri binarnih linijskih kodova

- RZ-kod (*nastavak*).
 - Bipolarni RZ-kod:
 - Znak «1» predločen je visokom razinom pravokutnog signala u prvoj polovici intervala znaka «1», dok se u drugoj polovici tog intervala vraća na nisku razinu odnosno na razinu nula kao i kod unipolarne vrste.
 - Znak «0» predločen je niskom odnosno negativnom razinom, dok se u drugoj polovici tog intervala vraća na razinu nula.
 - Bipolarni RZ-signal poprima tri diskretne razine → *kvaziternarni signal*.



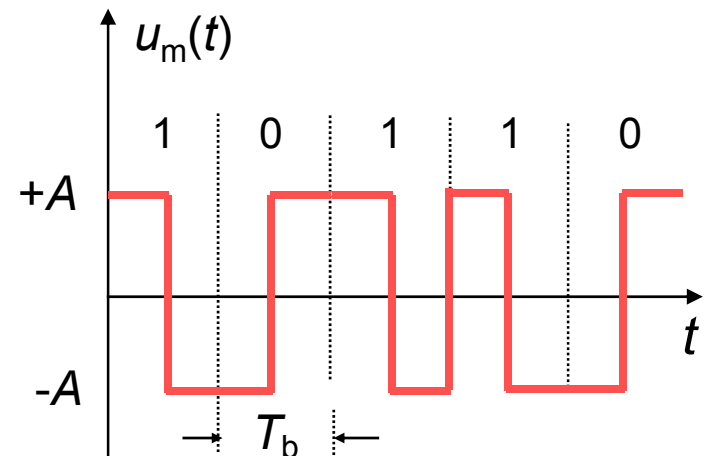
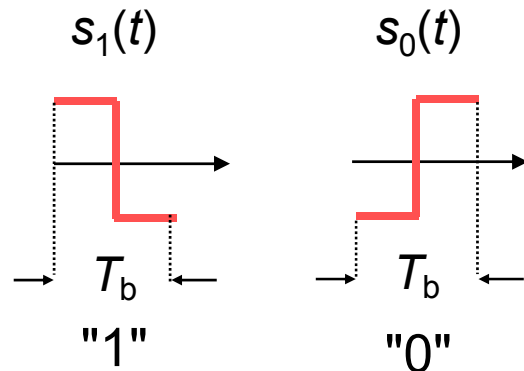
Primjeri binarnih linijskih kodova

- RZ-kod (*nastavak*).
 - Razina RZ-signalna mijenja se i kod pojave slijeda sukcesivnih znakova «1», a kod koda bipolarne vrste i kod slijeda sukcesivnih znakova «0».
 - RZ-signal sadrži istosmjernu komponentu i zauzima veću širinu pojasa od odgovarajućeg NRZ-signalna.
 - Osjetljiviji je na šum i zahtijeva nešto složenije sklopovlje.
 - Olakšana je sinkronizacija bita. Nisu potrebni posebni taktni impulsi.



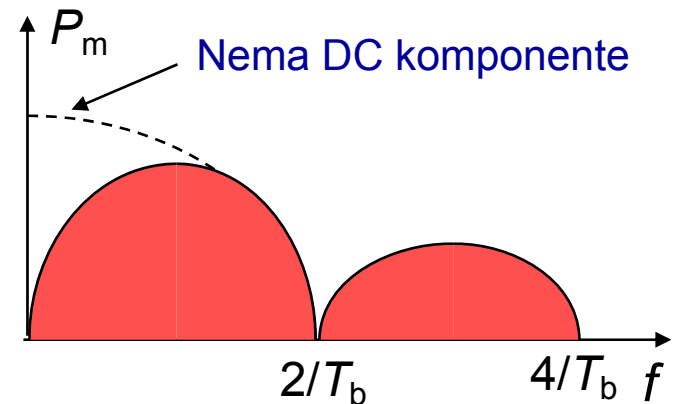
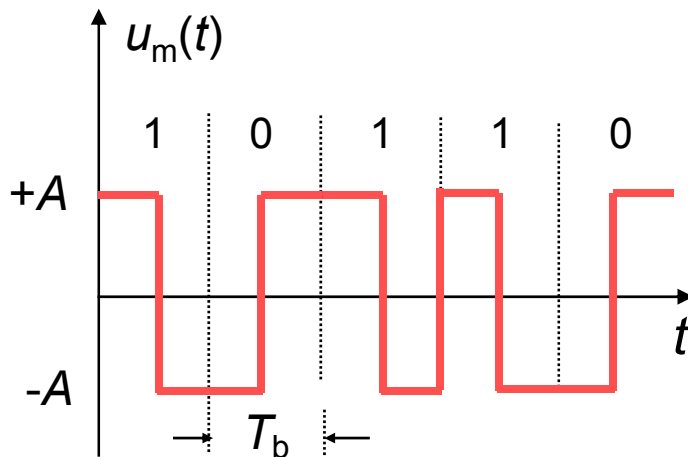
Primjeri binarnih linijskih kodova

- *Manchester kod* obilježava promjena razine signala u sredini intervala svakog znaka.
 - Znak «0» predodčen je porastom razine signala u sredini znaku pripadajućeg intervala, tj. niska je razina u prvoj polovici, a visoka u drugoj polovici intervala binarnog znaka.
 - Znak «1» predodčen je snižavanjem razine signala u sredini znaku pripadajućeg intervala, tj. visoka je razina u prvoj polovici, a niska u drugoj polovici intervala binarnog znaka.

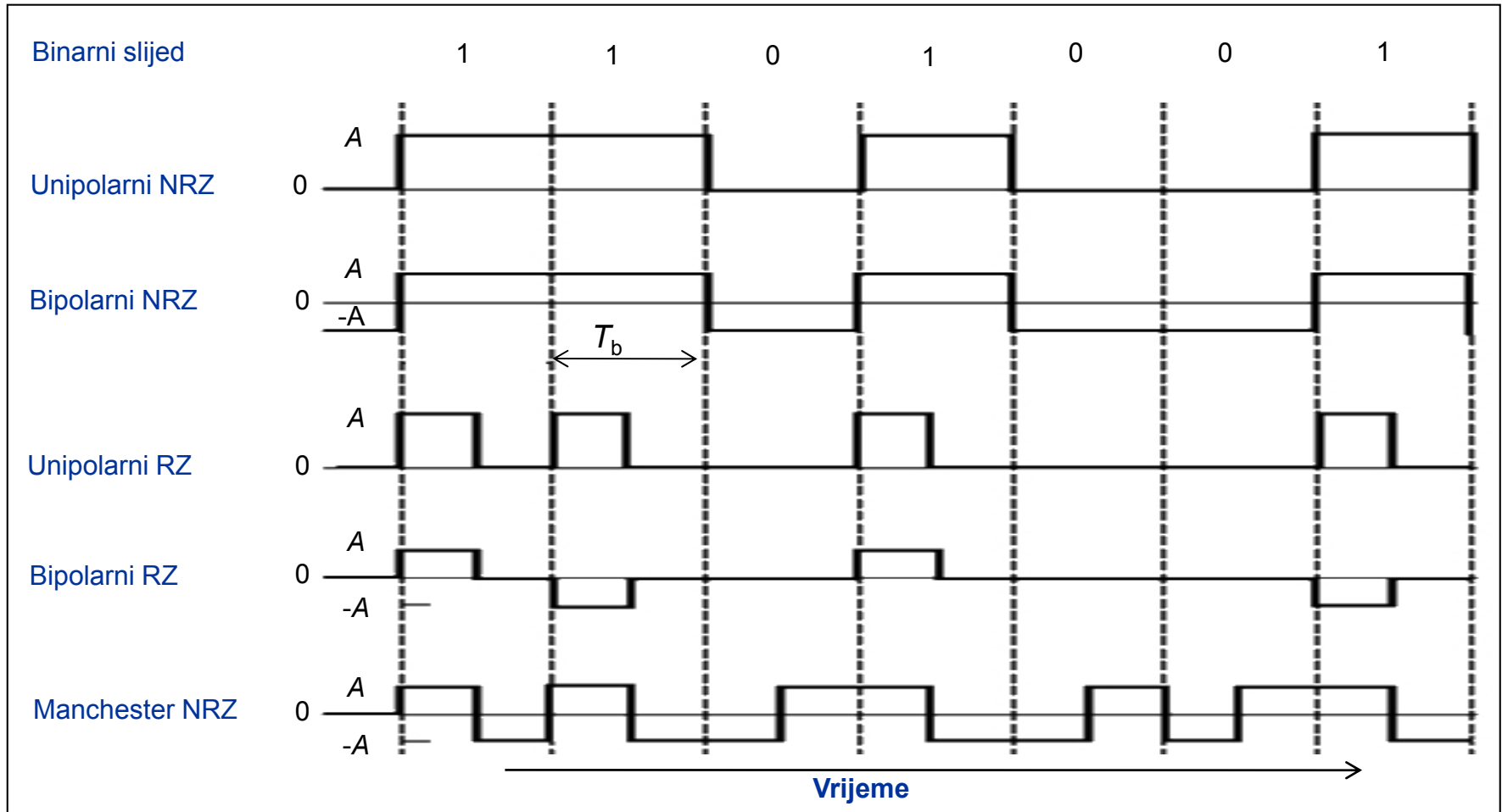


Primjeri binarnih linijskih kodova

- Manchester kod (*nastavak*).
 - Signal Manchester linijskog koda nema istosmjernu komponentu što mu je i najznačajnija osobina.
 - Nisu potrebni posebni takti impulsi za sinkronizaciju, ali su odgovarajući sklopovi nešto složeniji.



Primjeri binarnih linijskih kodova



M-arni linijski kodovi

- Nasuprot binarnim signalima stoje tzv. *M-arni digitalni signali*.
- Oni poprimaju M diskretnih razina,
($M = 2^w$, $w = 1, 2, 3, \dots$).
- Svakoj od M razina pridružuje se, $w = \log_2 M$
binarnih znakova (bitova).
- U nastavku je primjer kvaternarnoga linijskog koda.

Primjer kvaternarnoga linijskog koda

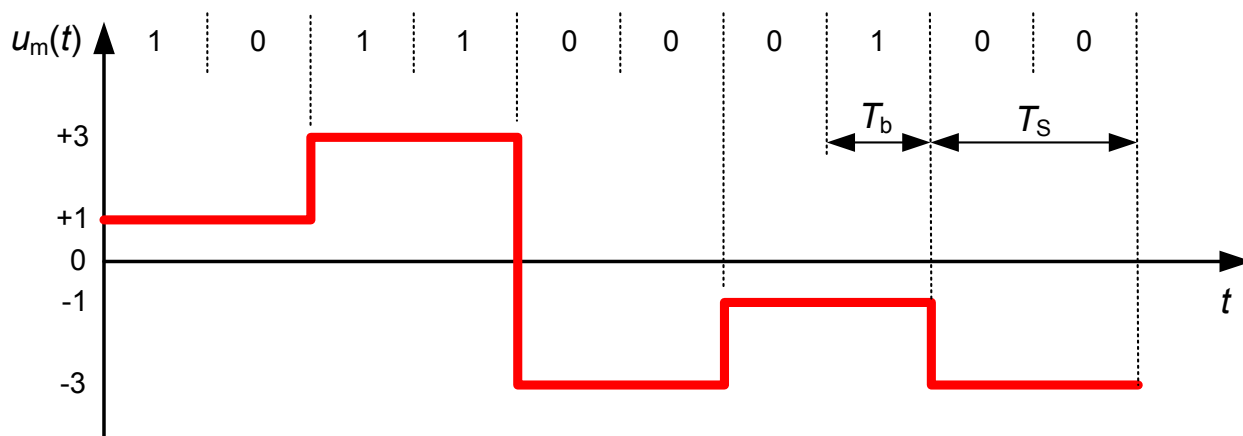
- *Kvaternarni digitalni signal* poprima četiri diskretne razine.
 - Razine su označene npr. s -3, -1, +1 i +3.
 - On sadrži 4 simbola.
 - Svakoj razini kvaternarnog signala pridružuju se dva bita, *dibit*, npr. prema sljedećem pravilu,

«00» → -3

«10» → +1

«01» → -1

«11» → +3



Diferencijalno kodirani linijski kodovi

- Linijski kodovi iz druge skupine (informacija je u promjeni razine signala) nastaju diferencijalnim kodiranjem izvornoga binarnog slijeda. Primjeri:
 - Linijski kod s *diferencijalno kodiranim znakom «1»* obilježava promjena razine signala na početku svakog intervala kojem je pridružen znak «1».
 - Linijski kod s *diferencijalno kodiranim znakom «0»* obilježava promjena razine signala na početku svakog intervala kojem je pridružen znak «0».
- Ovi linijski kodovi nastaju npr. NRZ-prikazom diferencijalno kodiranoga izvornog binarnog slijeda. Primjeri:
 - *Diferencijalnim kodiranjem «jedinice»* mijenja se binarni znak u diferencijalno kodiranom slijedu pri pojavi znaka «1» u izvornom slijedu. Pri pojavi znaka «0» ponavlja se prethodni znak.
 - U slijedu s *diferencijalno kodiranom «nulom»* mijenja se znak pri pojavi znaka «0», dok se pri pojavi «1» znak diferencijalno kodiranog slijeda ne mijenja.

Izvorni niz		1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Niz s diferencijalno kodiranim «1»	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
Niz s diferencijalno kodiranim «0»	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0

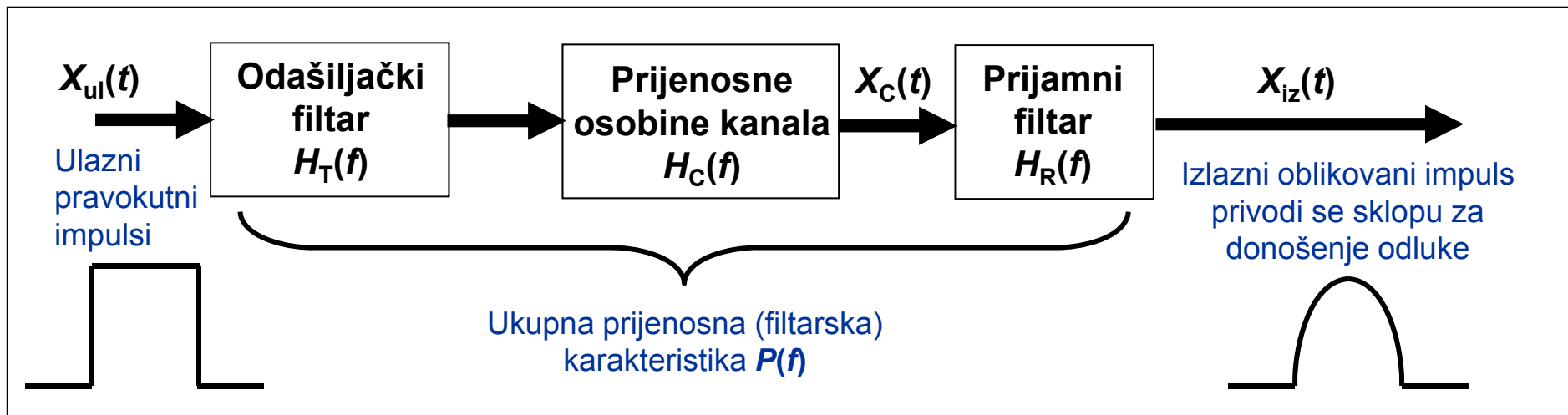
Prijenos digitalnog signala u osnovnom pojasu frekvencija

Osnovni pojmovi i obilježja prijenosa

- Pojam «*osnovni pojas frekvencija*» označuje pojas frekvencija izvornoga informacijskog signala.
- Signal u osnovnom pojasu frekvencija je električni signal linijskog koda kojim su predočeni binarni podaci odnosno slijed «0» i «1». Računalo je na primjer izvorom digitalnog signala u osnovnom pojasu frekvencija.
- Prijenos digitalnih podataka preko fizičkoga komunikacijskog kanala ograničavaju dva neizbježna faktora:
 - *smetnje* odnosno *interferencija među simbolima* digitalnog signala (ISI, *Intersymbol Interference*) koje nastaju zbog nesavršenosti frekvencijske karakteristike prijenosnog kanala i,
 - *šum u kanalu* pod kojim se podrazumijeva neželjeni slučajni električni signal koji se javlja na izlazu prijenosnog kanala zajedno s korisnim informacijskim signalom.
- Pravokutni impuls, koji je osnova svih linijskih kodova, zauzima pojas frekvencija beskonačne širine.

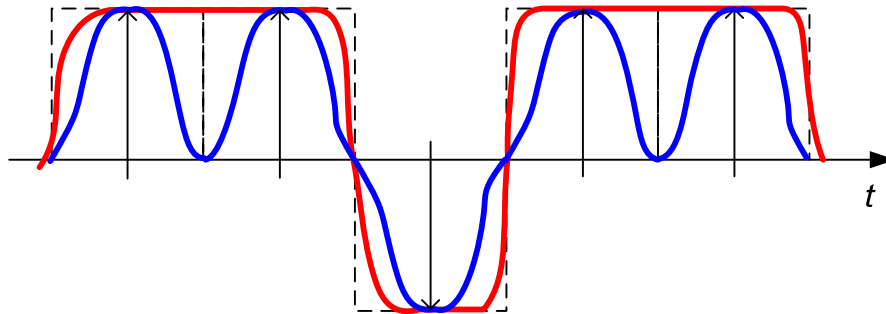
Osnovni pojmovi i obilježja prijenosa

- Prijenosni je kanal konačne širine pojasa → potrebno je ograničiti širinu pojasa digitalnog signala — filtrirati digitalni signal.



- Digitalnom signalu konačne širine pojasa kontinuirano se mijenja razina između diskretnih stanja.
- Bitna je samo razina signala u trenucima donošenja odluke o primljenom binarnom znaku.

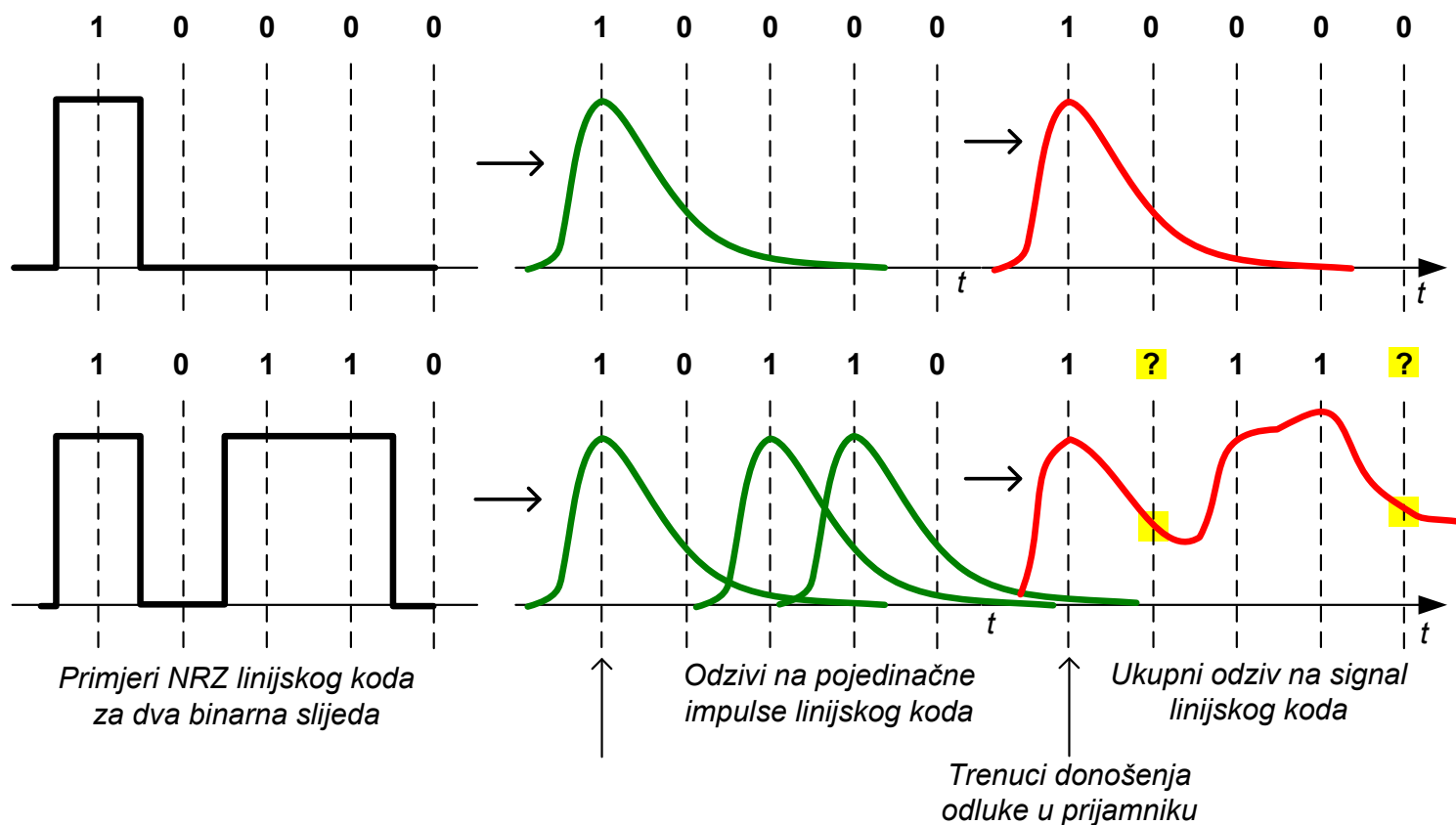
Utjecaj širine pojasa na digitalni signal



- Filtar za ograničavanje širine pojasa obavlja *oblikovanje impulsa digitalnog signala*.
- Propusti li se pravokutni impuls kroz sustav konačne širine pojasa, impuls se proširuje u vremenu, tako da će se dio tako proširenog impulsa pojaviti i u intervalima susjednih impulsa (znakova).
- Prošireni impuls djeluje na signal u susjednim intervalima i stvara smetnju u susjednim intervalima, a moguće je i preko više intervala → nastaje smetnja odnosno interferencija među simbolima – ISI.

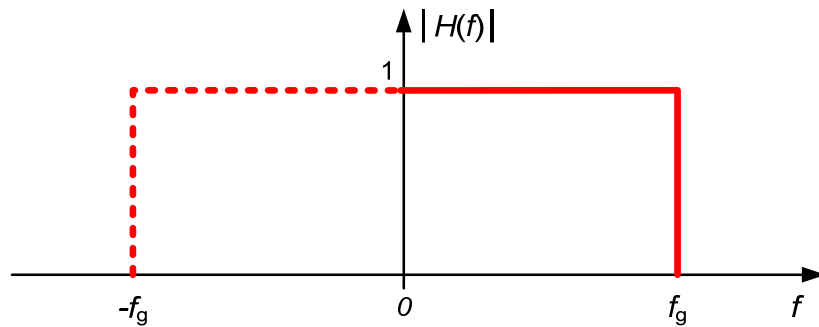
Filtriranje digitalnog signala

Posljedice ograničavanja širine pojasa digitalnog signala



- Negativni upliv ISI odražava se na potencijalno netočnom prepoznavanju pojedinih binarnih znakova na prijamnoj strani.

Filtriranje digitalnog signala



Idealni niskopropusni filter:

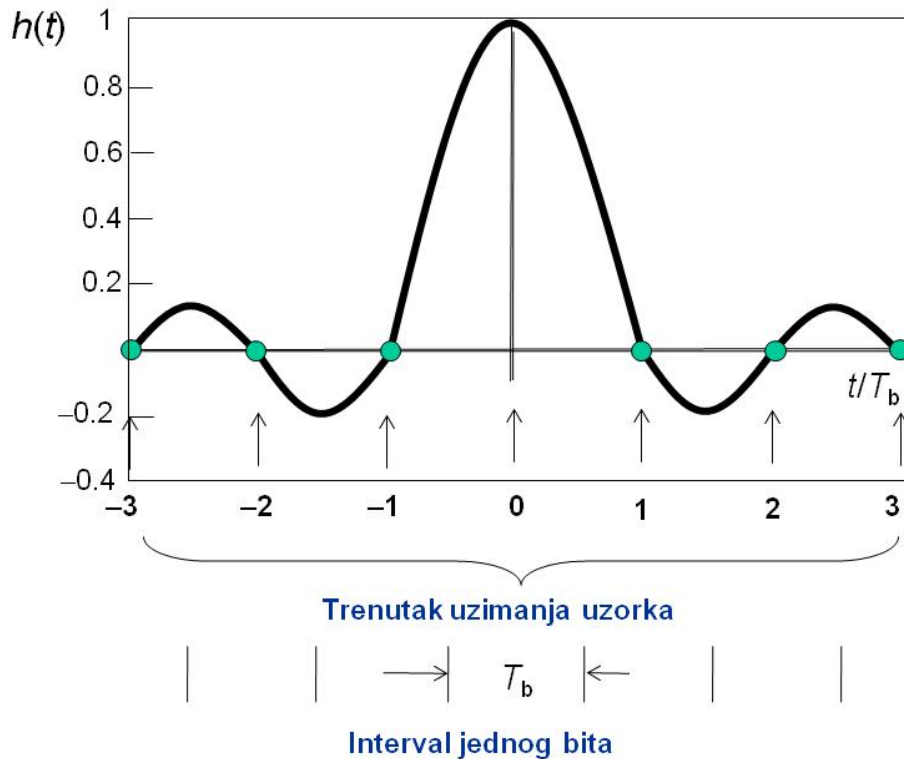
- Idealni filter — pravokutna frekvencijska karakteristika, granična frekvencija filtra f_g .

$$|H(j2\pi f)| = \begin{cases} 1, & \text{za } |f| \leq f_g, \\ 0, & \text{za } |f| > f_g. \end{cases}$$

- Diracov impuls na ulazu filtra stvara odziv oblika,

$$h(t) = F^{-1}\{H(j2\pi f)\} = 2f_g \frac{\sin(2\pi f_g t)}{2\pi f_g t}.$$

Filtriranje digitalnog signala



Idealni niskopropusni filter (nastavak):

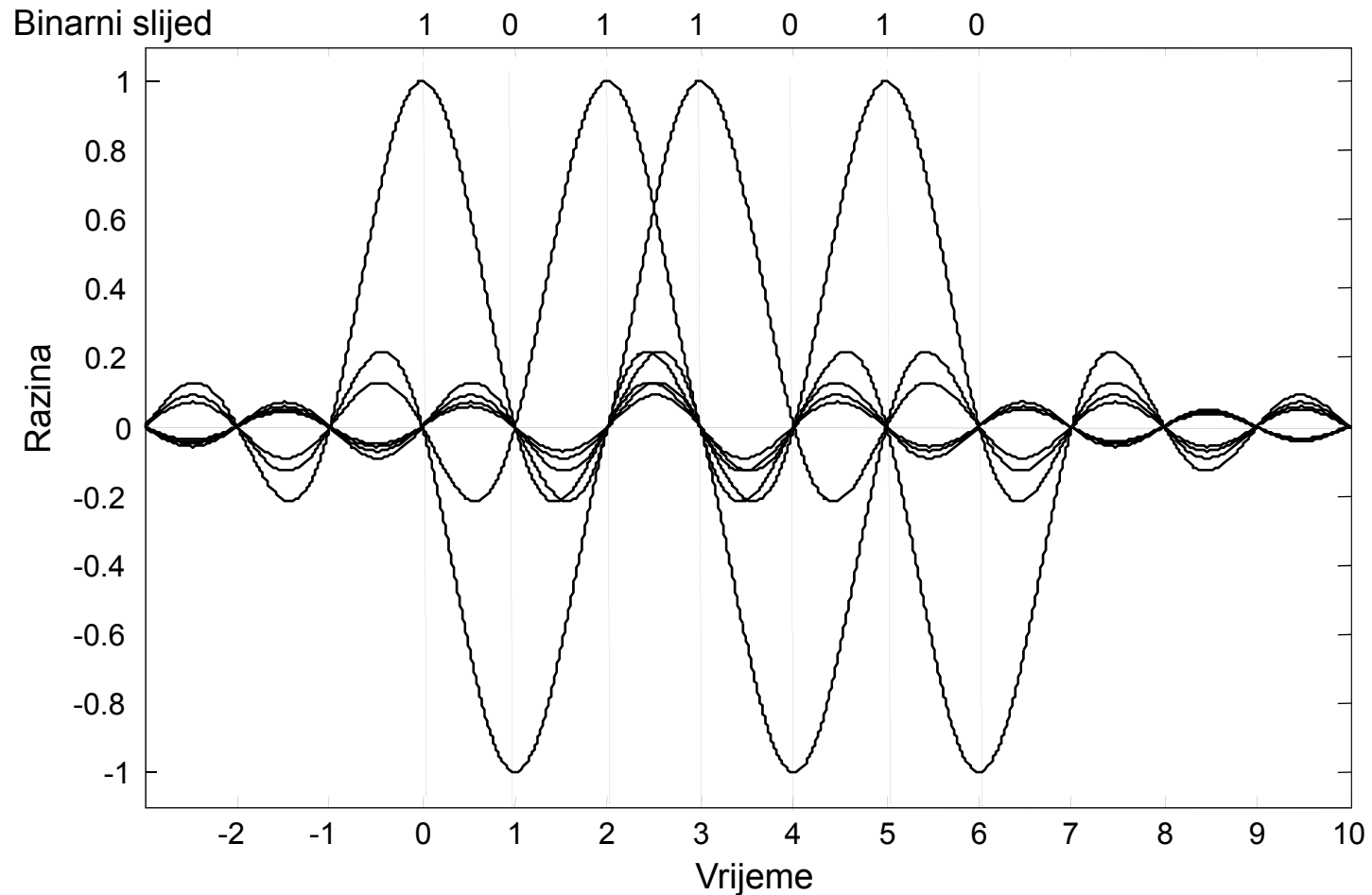
- Nul-točke impulsnog odziva su u trenucima,

$$k \cdot \frac{1}{2f_g} = k \cdot T_b, \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Ako bi se drugi impuls pojavio u trenutku nultočke impulsnog odziva, onda ne bi nastala smetnja među simbolima.
- Idealni filter granične frekvencije f_g omogućuje prijenos $2f_g$ simbola u sekundi bez smetnji među njima* ←
1. Nyquistov teorem – teorem minimalne širine pojasa.

Filtriranje digitalnog signala

Idealni niskopropusni filter (nastavak):



Filtriranje digitalnog signala

Idealni niskopropusni filter (nastavak):

- Nyquistova brzina prijenosa R_N predstavlja najvišu ostvarivu brzinu rada bez smetnji među simbolima u sustavu s idealnom frekvencijskom prijenosnom karakteristikom.

$$R_N = 2 \cdot f_g.$$

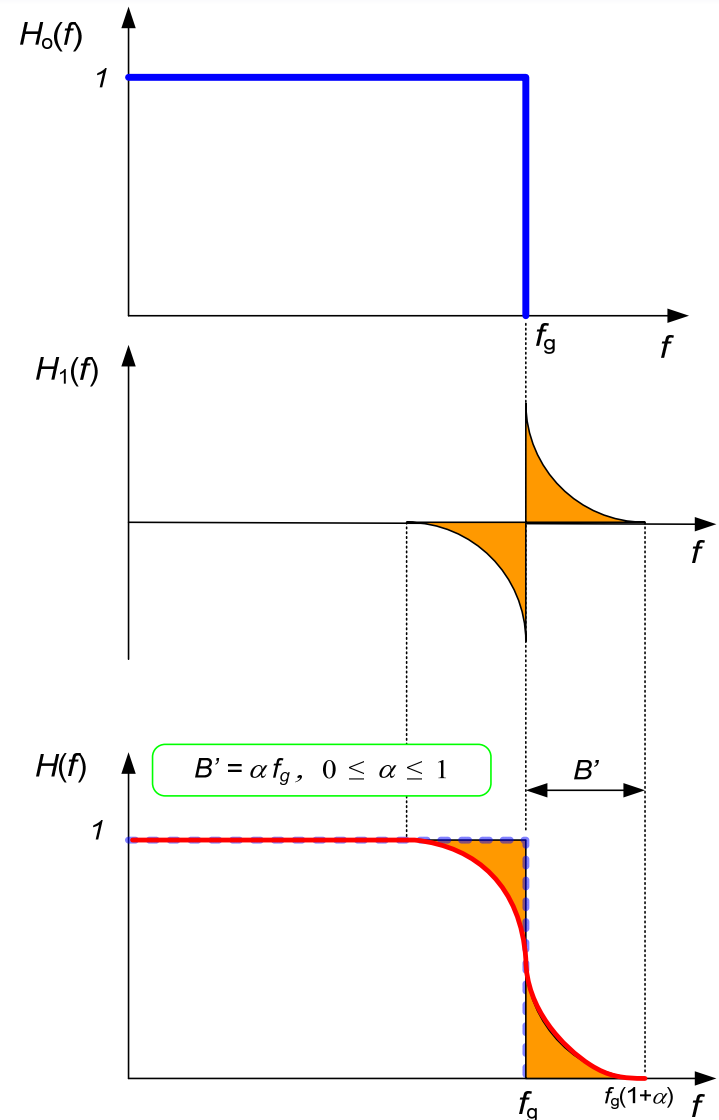
- *Spektralna učinkovitost postupka* $R_b/B \rightarrow$ broj prenesenih bita u sekundi po jedinici širine pojasa, tj. po Hz. Mjeri se u jedinicama bit/s/Hz.
- Najviša teorijski ostvariva spektralna učinkovitost prijenosa u osnovnom pojasu frekvencija iznosi onda 2 bit/s/Hz.
- Idealni Nyquistov filter ne može se praktično izvesti.

Filtriranje digitalnog signala

- 2. Nyquistov teorem – teorem simetrije → bilo koji idealni filter širine pojasa f_g konvoluiran s proizvoljnom simetričnom funkcijom s linearnom fazom oko f_g daje isti nulti ISI kao i idealni filter.
- Filtrirani signal zauzima veću širinu pojasa od minimalno potrebne širine, ali moguća je praktična izvedba filtra.

Niskopropusni filter s kosinusnim zaobljenjem karakteristike

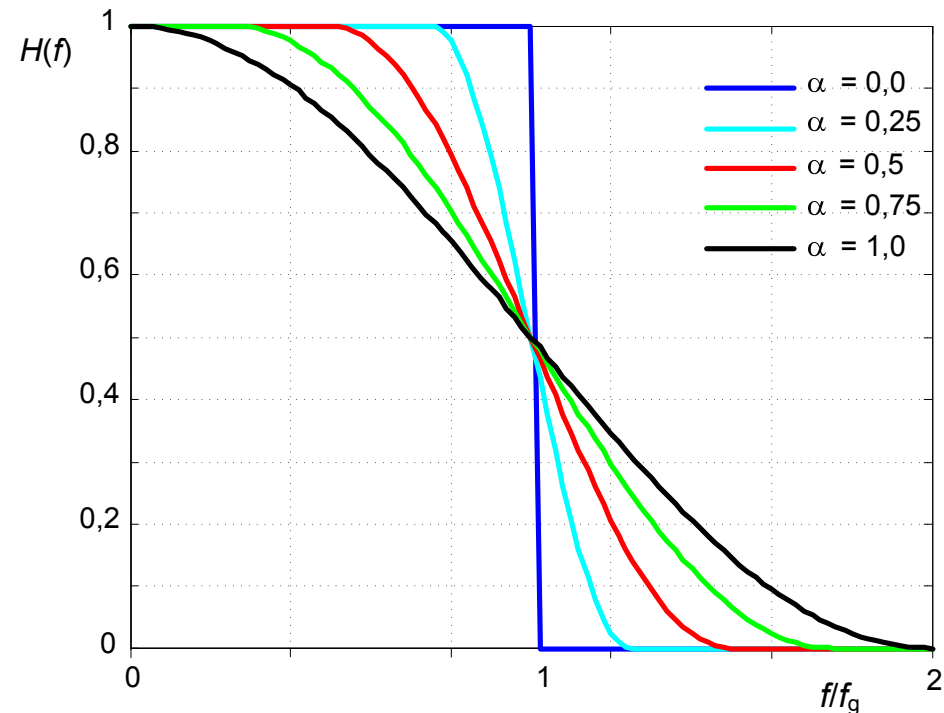
- U digitalnim sustavima često se koristi filter s zaobljenjem frekvencijske karakteristike po zakonu kosinus kvadrat funkcije (filter s kosinusnim zaobljenjem).



Filtriranje digitalnog signala

$$|H(j2\pi f)| = \begin{cases} 1, & \text{za } 0 \leq f \leq f_g(1 - \alpha), \\ \cos^2 \frac{\pi}{4\alpha f_g} [f - f_g(1 - \alpha)], & \text{za } f_g(1 - \alpha) \leq f \leq f_g(1 + \alpha), \\ 0, & \text{za } f_g(1 + \alpha) \leq f \leq \infty. \end{cases}$$

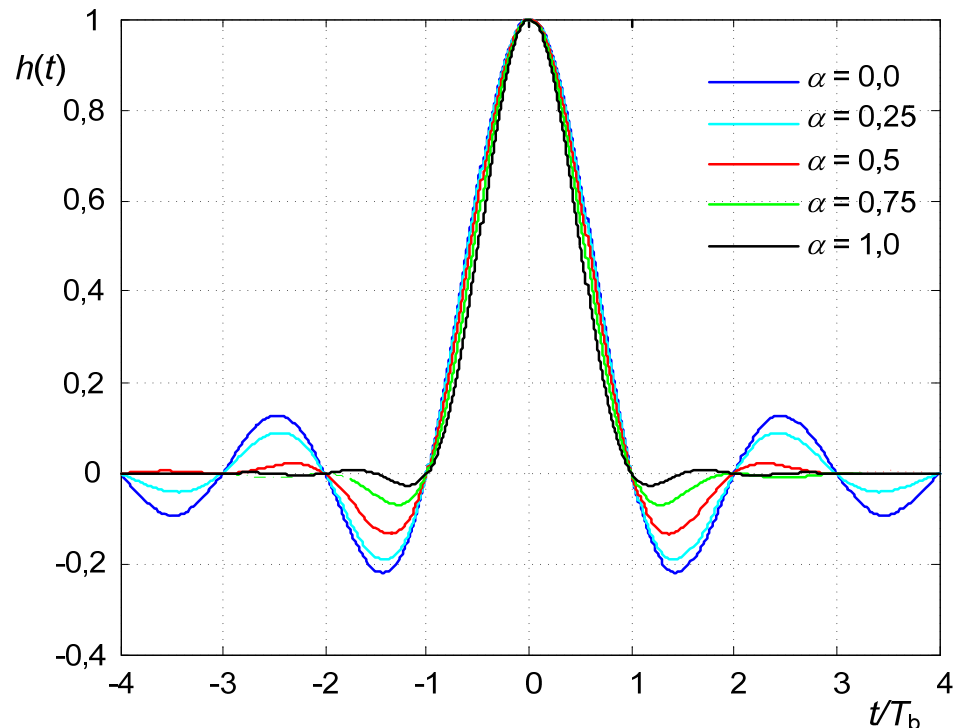
- Veličina α naziva se *faktorom zaobljenja* ili *faktorom strmine filtra*. On pokazuje relativno povećanje širine pojasa u odnosu na minimalnu vrijednost.
- Impulsni odziv takvog filtra dobiva se inverznom Fourierovom transformacijom frekvencijske prijenosne karakteristike $H(j2\pi f)$.



Filtriranje digitalnog signala

- Zaobljenjem karakteristike filtra ne mijenja se položaj nul-točaka impulsnog odziva → uvjeti za prijenos bez smetnji među simbolima su ispunjeni kao i kod idealnog filtra.
- Primjenom filtra s kosinusnim zaobljenjem postiže se konačna širina pojasa digitalnog signala bez unošenja smetnji među simbolima i za realno izvodiive filtre.
- U praksi se koriste filtri s faktorima zaobljenja najčešće do oko 0,4.

$$h(t) = \frac{\sin(2\pi f_g t)}{2\pi f_g t} \cdot \frac{\cos(2\pi \alpha f_g t)}{1 - (4\alpha f_g t)^2}$$



Filtriranje digitalnog signala

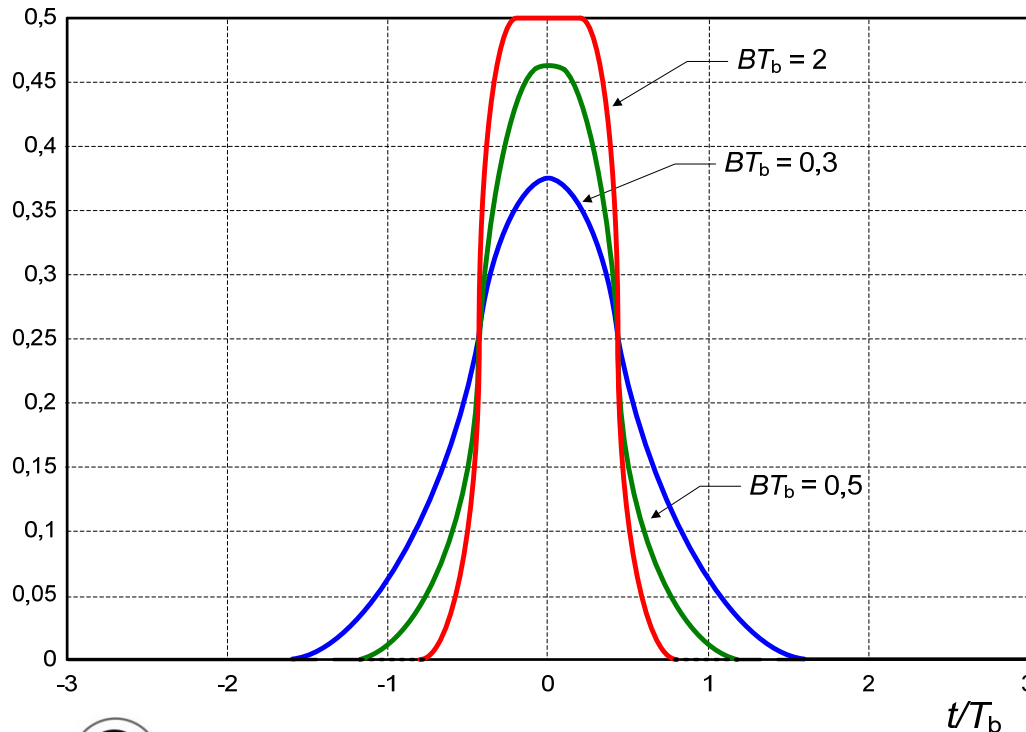
- Kad je $\alpha = 0,4$ onda je širina pojasa $B = 1,4 \cdot f_g$ pa to daje,
 Spektralna učinkovitost $= \frac{2}{1,4} = 1,43 \text{ bit/s/Hz}$.
- Na frekvenciji $f_g(1 + \alpha)$ filter za oblikovanje morao bi teorijski potpuno prigušiti ulazni signal (beskonačno prigušenje). U praksi se zadovoljavamo prigušenjem od **35 dB** na toj frekvenciji.
- Radi potrebe za filtriranjem digitalnog signala prije odašiljanja kao i nakon prijama funkcija filtriranja $H(j2\pi f)$ se raspodjeljuje na odašiljački i na prijamni dio komunikacijskog sustava.
- Odašiljački i prijamni filter jednakih su frekvencijskih karakteristika koje odgovaraju,
 drugom korijenu od $H(j2\pi f)$, tj. $\sqrt{H(j2\pi f)}$,
 pa ukupna funkcija filtriranja u odašiljaču i prijamniku odgovara karakteristici s kosinusnim zaobljenjem.

Gaussov niskopropusni filter

- Impulsni je odziv Gaussova filtra,

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma T_b} e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2 T_b^2}}, \quad \text{gdje je, } \sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi B T_b}.$$

- B označena je tzv. 3-dB širina pojasa Gaussovog filtra.

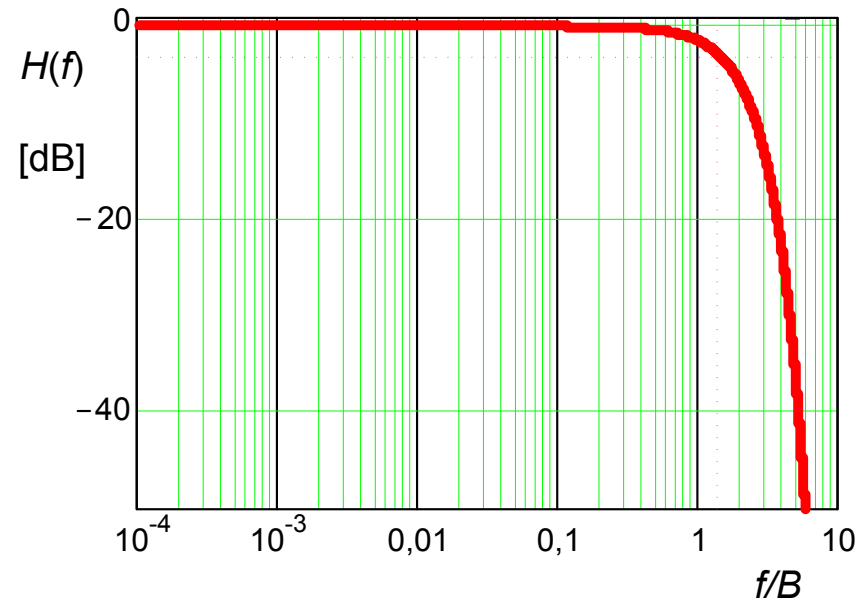


- Konvolucijom funkcije impulsnog odziva Gaussovog filtra $h(t)$ i funkcije pravokutnog signala kojim se predočuje jedan bit dobiva se odziv Gaussovog filtra na realne linijske kodove prema slici.

Gaussov niskopropusni filter

- Frekvencijska je prijenosna karakteristika određena funkcijom,

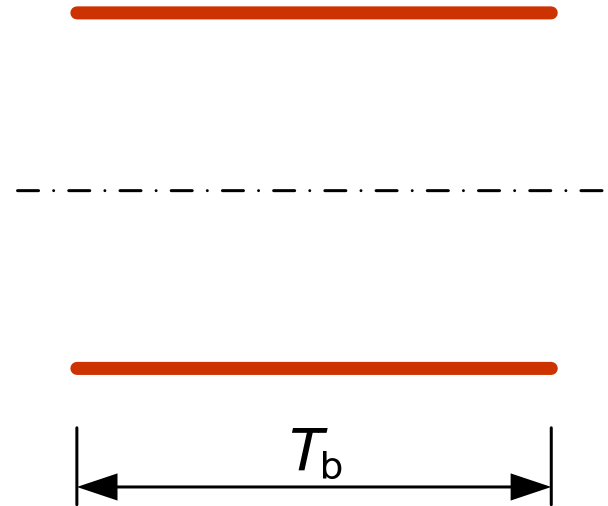
$$H(j2\pi f) = F\{h(t)\} = e^{-\left(\frac{f}{B}\right)^2 \frac{\ln 2}{2}}.$$



- Filter definira tzv. normirana širina pojasa filtra koja je jednaka $B \cdot T_s$, odnosno $B \cdot T_b$ u binarnih signala.
- Kod malih širina pojasa Gaussova filtra impuls na njegovu izlazu se proširuje na intervale susjednih simbola → nastaje ISI.

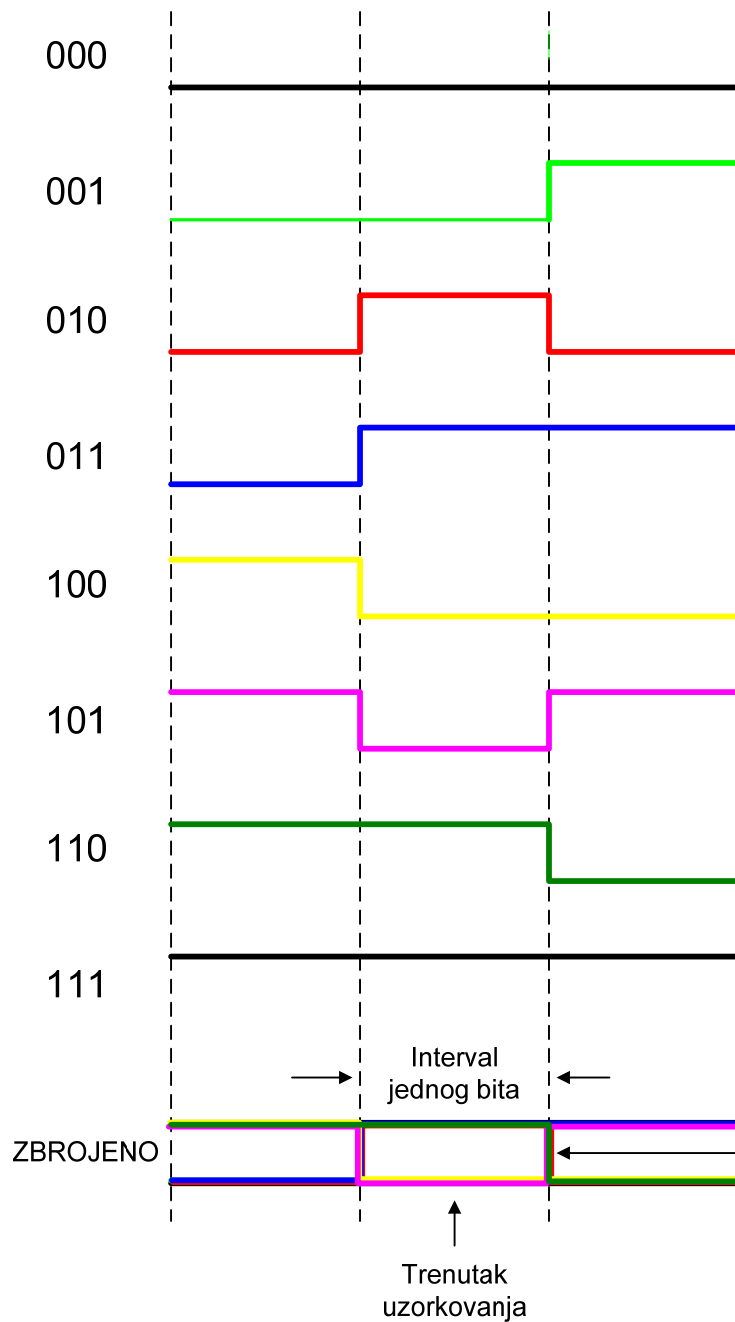
Dijagram oka

- *Dijagram oka* služi za procjenu kvalitete digitalnoga signala.
- Dijagram oka nastaje preklapanjem velikog broja intervala bita (simbola) jedan preko drugog.
- Dijagram oka može se dobiti na zaslonu osciloskopa ako se analizirani digitalni signal privede y-pločicama, a vremenska baza sinkronizirana s taktnim impulsima x-pločicama. Perioda vremenske baze mora biti neki višekratnik od T_b .
- Dijagram oka idealno pravokutnoga digitalnog signala odgovara dvjema horizontalnim crtama.

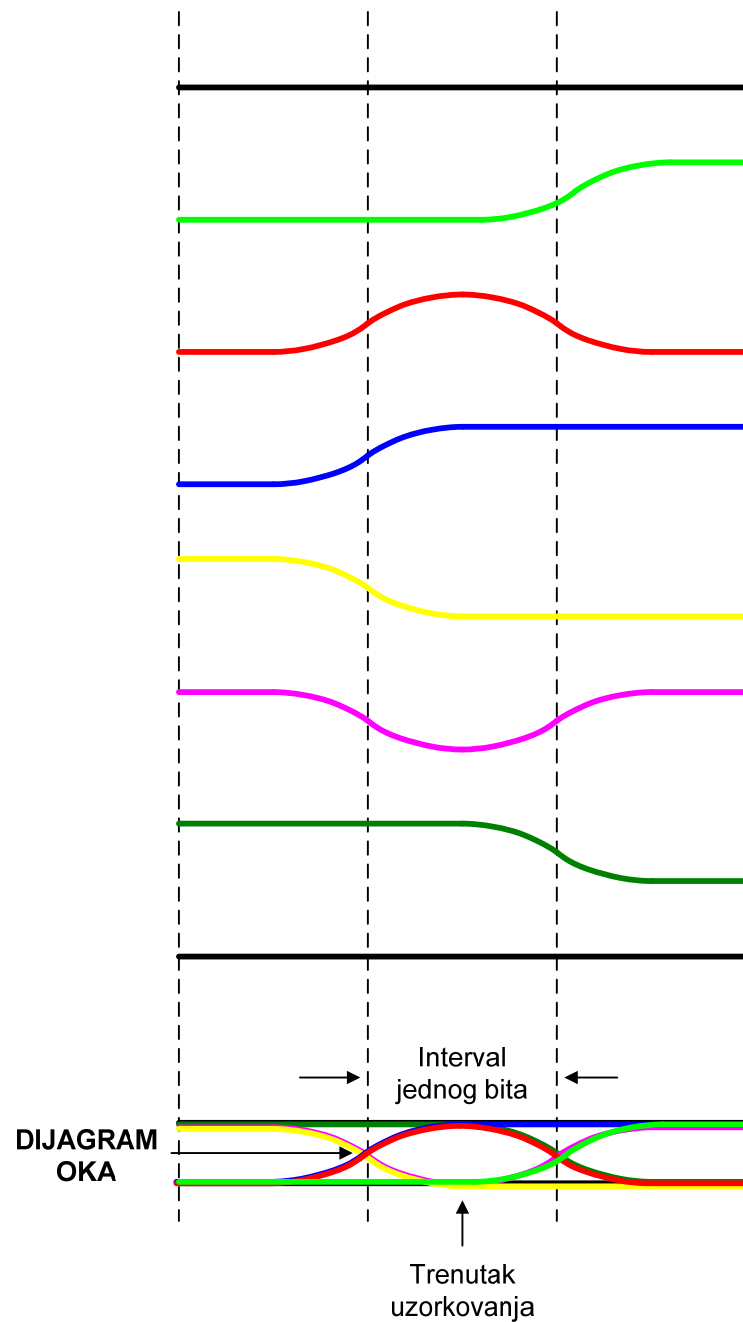


Uzorak

Nefiltrirani NRZ-signal

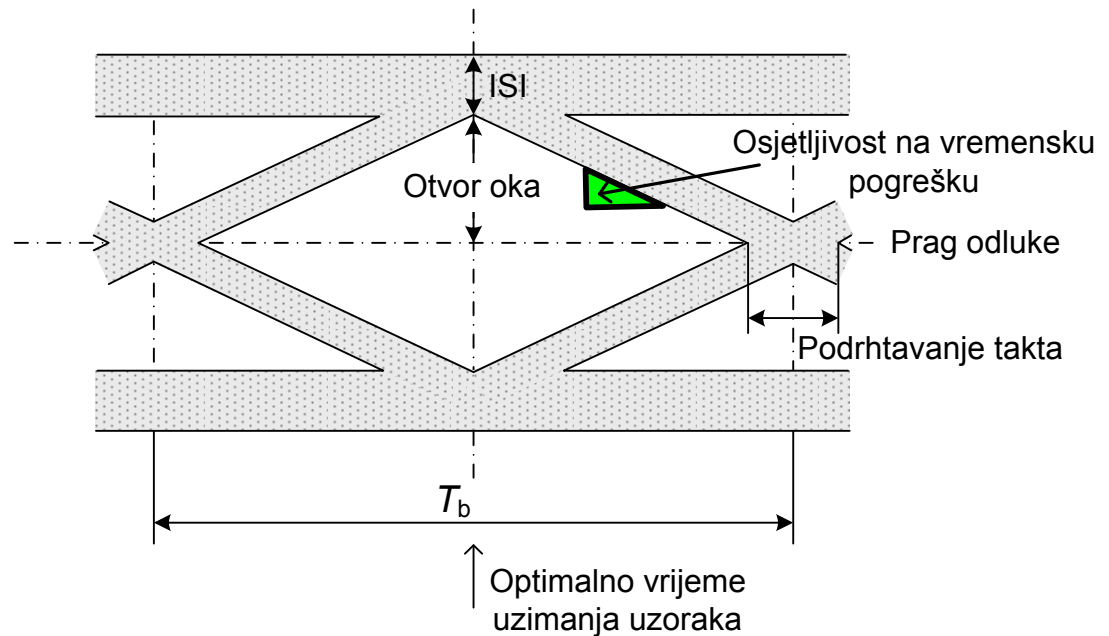


Filtrirani NRZ-signal



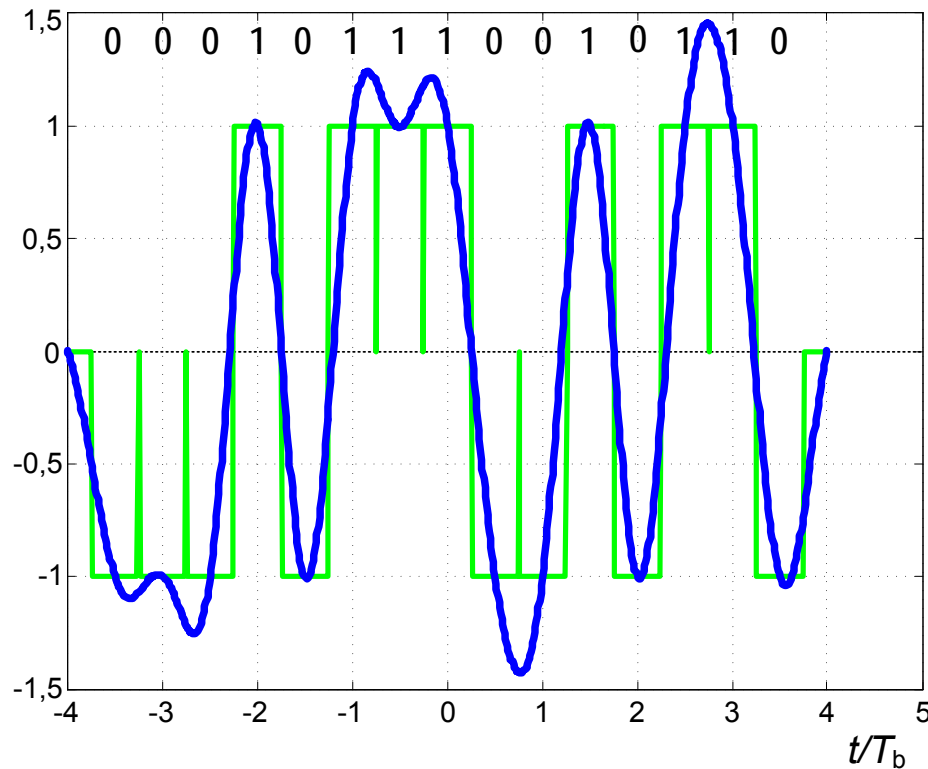
Dijagram oka

- Na temelju dijagrama oka može se npr. procijeniti:
 - veličina smetnji među znakovima — ISI smanjuje otvor oka (idealno iznosi 100%), u praksi zadovoljavaju otvori oka preko 50%,
 - vremenska točnost regeneriranoga taktnog signala (podrhtavanje takta).
Ukoliko se sinkronizacija osigurava iz prolazaka kroz nulu (čest slučaj), podrhtavanje dovodi do neoptimalnog vremena uzorkovanja.
 - Nelinearnosti u prijenosu uzrokuju asimetrično izobličeni dijagram oka.



Dijagram oka

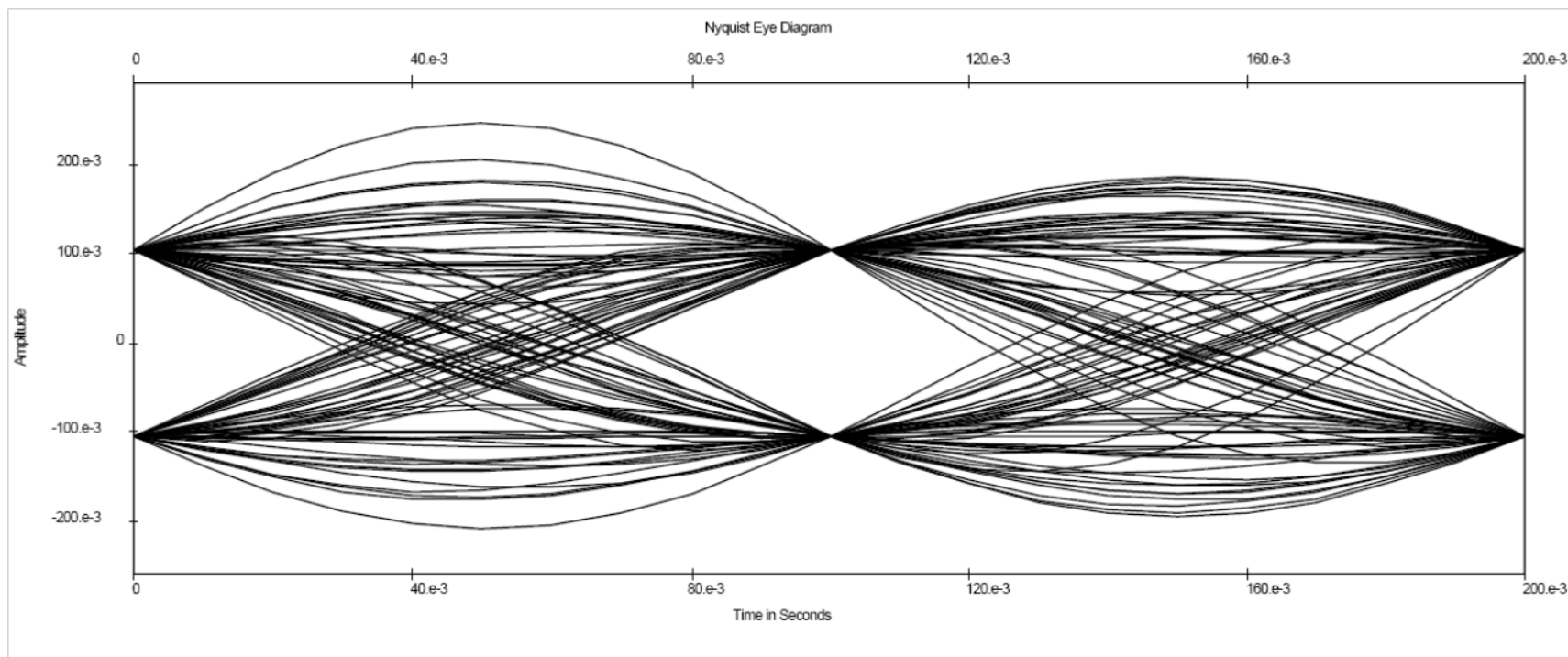
Izlazni signal idealnoga Nyquistova filtra (nema ISI)



- Kad u digitalnom signalu nema ISI razina signala u sredini intervala bita trajanja T_b poprima jednu od dvije nazivne vrijednosti (+1 ili -1 u primjeru na slici).

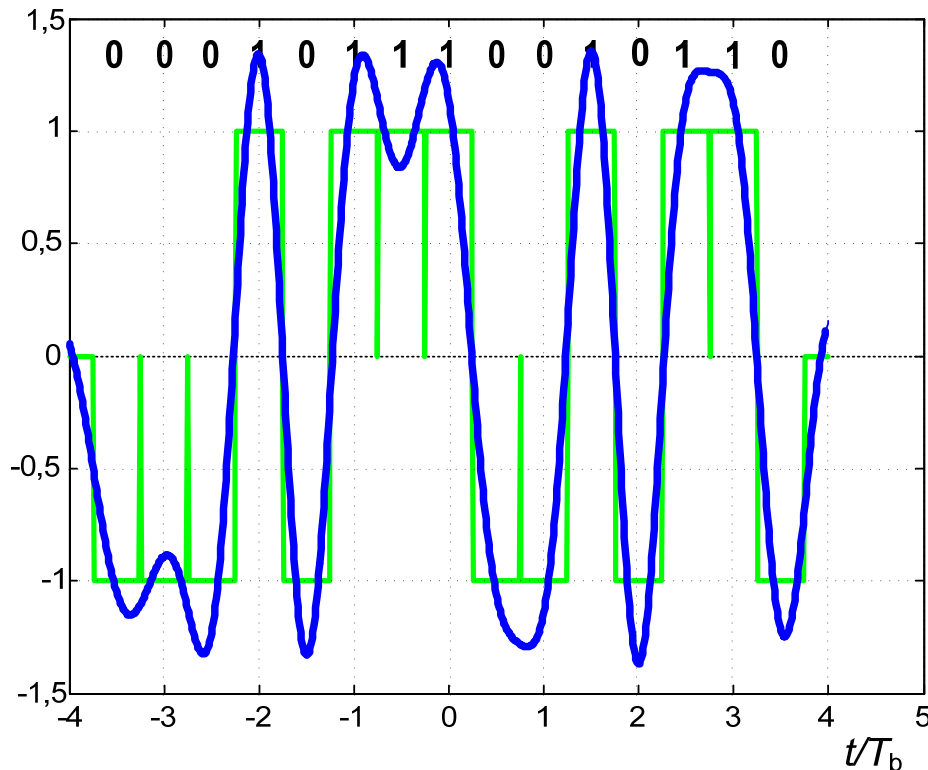
Dijagram oka

Dijagram oka izlaza idealnoga Nyquistova filtra (nema ISI)



Dijagram oka

Digitalni signal na izlaznim priključnicama filtra s karakteristikom $\sqrt{H(j2\pi f)}$ (postoji ISI)



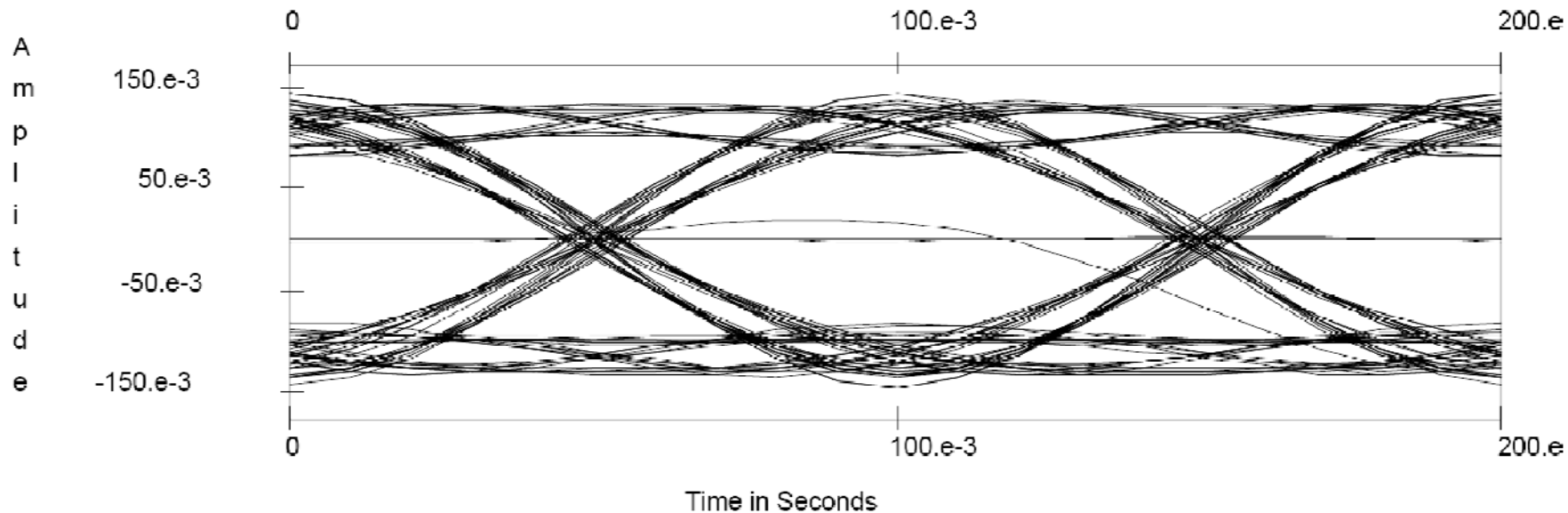
- Postojanje ISI u digitalnom signalu vidljivo je iz činjenice da razina signala u sredini intervala bita trajanja T_b ne poprima uvijek jednu od dvije nazivne vrijednosti (+1 ili -1 u primjeru na slici).

Dijagram oka

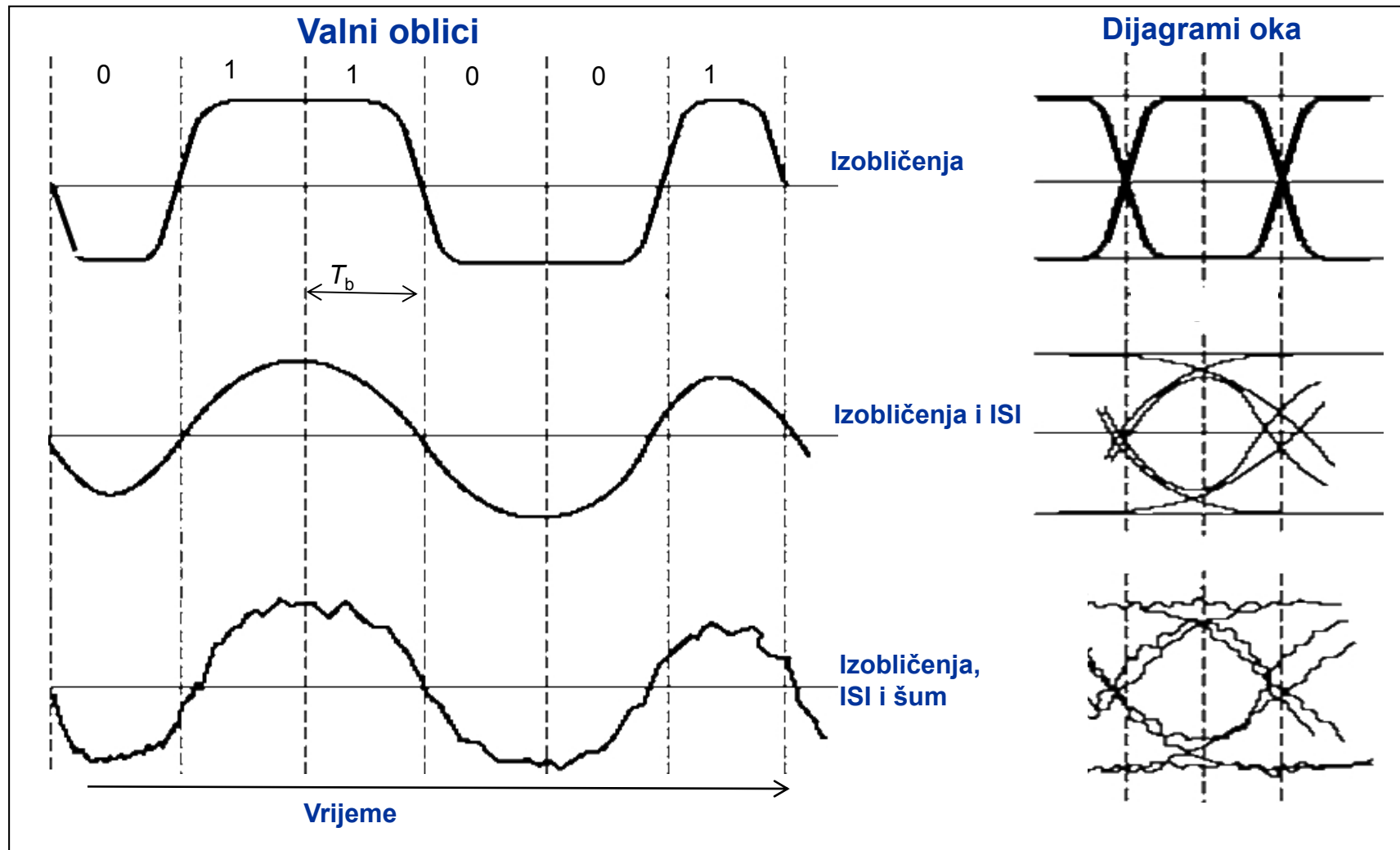
Dijagram oka (postoji ISI)

SystemView by ELANIX

Eye Diagram Root-raised Cosine



Dijagram oka



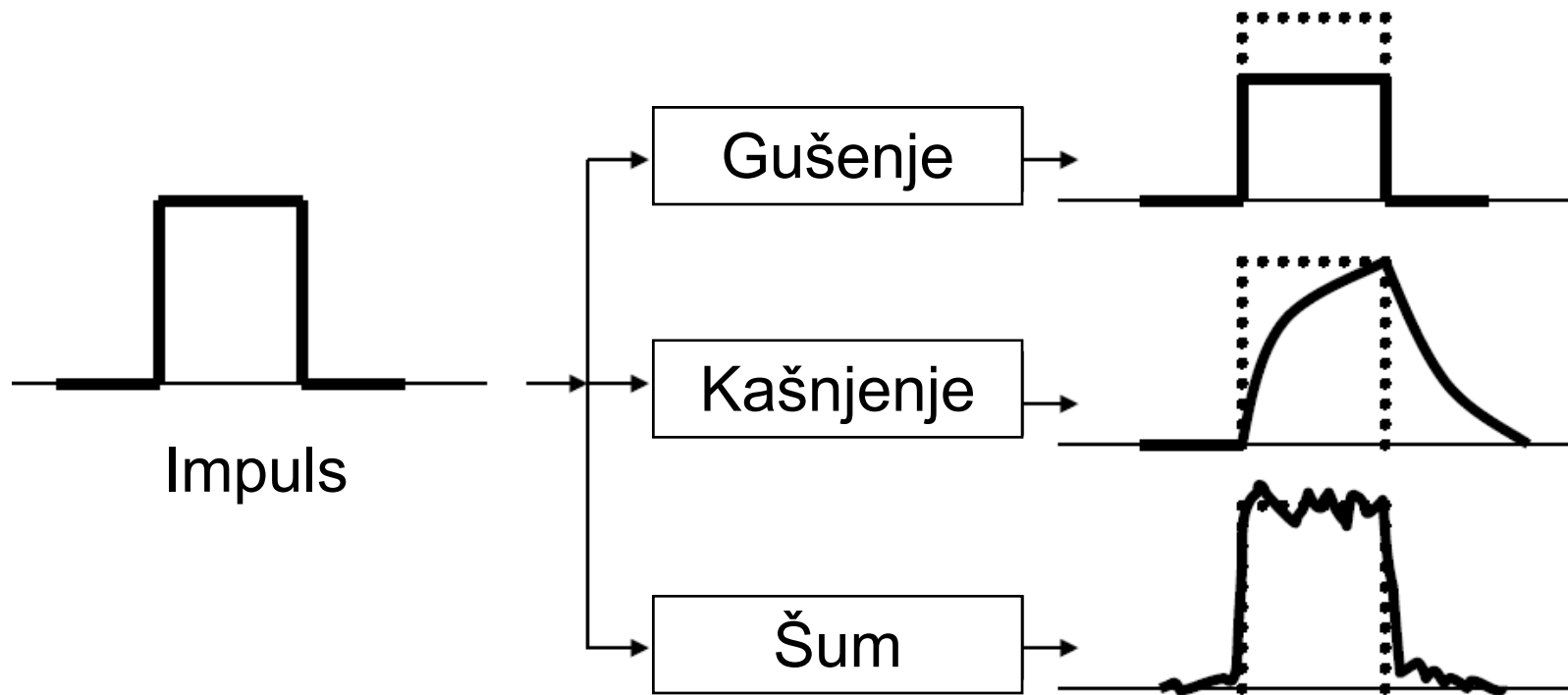
Ujednačavanje komunikacijskog kanala

- Prijenosni kanal linearnih i frekvencijski selektivnih osobina uzrokom je dodatnih smetnji među simbolima koje su posebno izražene kod prijenosa velikim brzinama.
- Na temelju poznavanja karakteristike kanala može se izvesti tzv. *filtar za ujednačavanje (Equalizer)* koji će kompenzirati izobličenja što ih unosi frekvencijski selektivni kanal. Filtar za ujednačavanje izvodi se kao transverzalni filtar.
- U radijskom prijenosu, posebno u mobilnim uvjetima, brzo se mijenja karakteristika prijenosnog kanala → potreban je transverzalni filtar za ujednačavanje s prilagodljivim koeficijentima.

Smetnje u komunikacijskom kanalu, kapacitet kanala

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- gušenje (atenuacija) signala, kašnjenje, šum
- u analognim sustavima izazivaju smanjenje kvalitete prijemnog signala, a u digitalnim sustavima pogreške bita

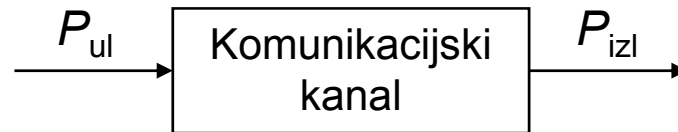


Smetnje u komunikacijskom kanalu

- gušenje signala
 - smanjenje razine električnog signala pri prijenosu komunikacijskim kanalom
 - ovisi o vrsti prijenosnog medija koji se rabi za prijenos signala
 - ovisi o frekvenciji signala (raste porastom frekvencije)
 - razina električnog signala mora biti dovoljno visoka, ali ne previsoka kako ne bi došlo do prepobude sklopova u odašiljaču ili prijamniku
 - razina prijamnog signala mora biti dovoljno visoka da omogući detekciju signala

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- gušenje signala (L)



- iskazuje se kao omjer snage signala na ulazu u komunikacijski kanal (P_{ul}) i snage signala na izlazu iz kanala (P_{izl}) u decibelima (dB)

$$L = 10 \log (P_{ul}/P_{izl})$$

- u decibelima se mogu izražavati i omjeri napona

$$L = 20 \log (U_{ul}/U_{izl})$$

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- gušenje signala se kompenzira uporabom pojačala
- pojačanje signala (A) definira se kao omjer snage signala na izlazu iz pojačala (P_{izl}) i snage signala na ulazu u pojačalo (P_{ul}) u dB

$$A = 10 \log (P_{\text{izl}} / P_{\text{ul}})$$

- ukoliko se za prijenos rabi široko frekvencijsko područje, provodi se ujednačavanje signala (ekvilizacija) kako bi se signali visokih frekvencija više pojačali od signala niskih frekvencija

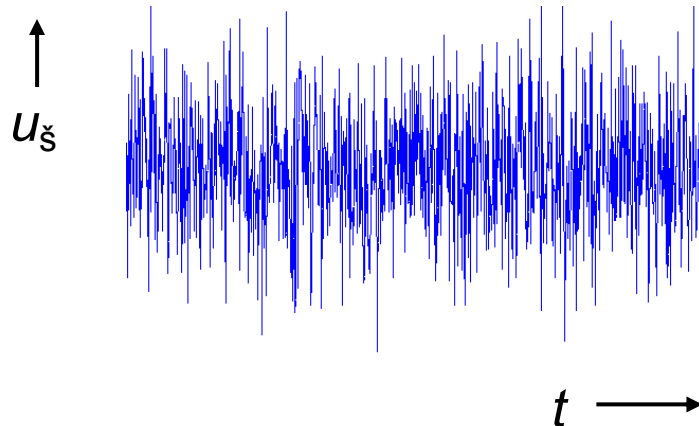
Smetnje u komunikacijskom kanalu

- izobličenje zbog promjenjivosti kašnjenja
 - značajka vođenih prijenosnih medija
 - ovisi o brzini propagacije signala kroz medij i duljini prijenosne linije
 - uzrokovano činjenicom da se brzina propagacije signala kroz medij mijenja promjenom frekvencije
 - različite frekvencijske komponente dolaze do prijarnika u različitim vremenskim trenucima što rezultira u različitim faznim pomacima između različitih frekvencija
 - ukoliko se fazni pomaci mijenjaju nelinearno u odnosu na frekvenciju pojavljuje se fazno izobličenje signala
 - ukoliko se fazni pomaci mijenjaju linearno u odnosu na frekvenciju signal neće biti izobličen
- u digitalnim komunikacijama ova pojava izaziva proširenje impulsa i smetnje među simbolima (komponente signala jednog bita se proširuju na položaje drugih bita) koje ograničavaju brzinu prijenosa u sustavu

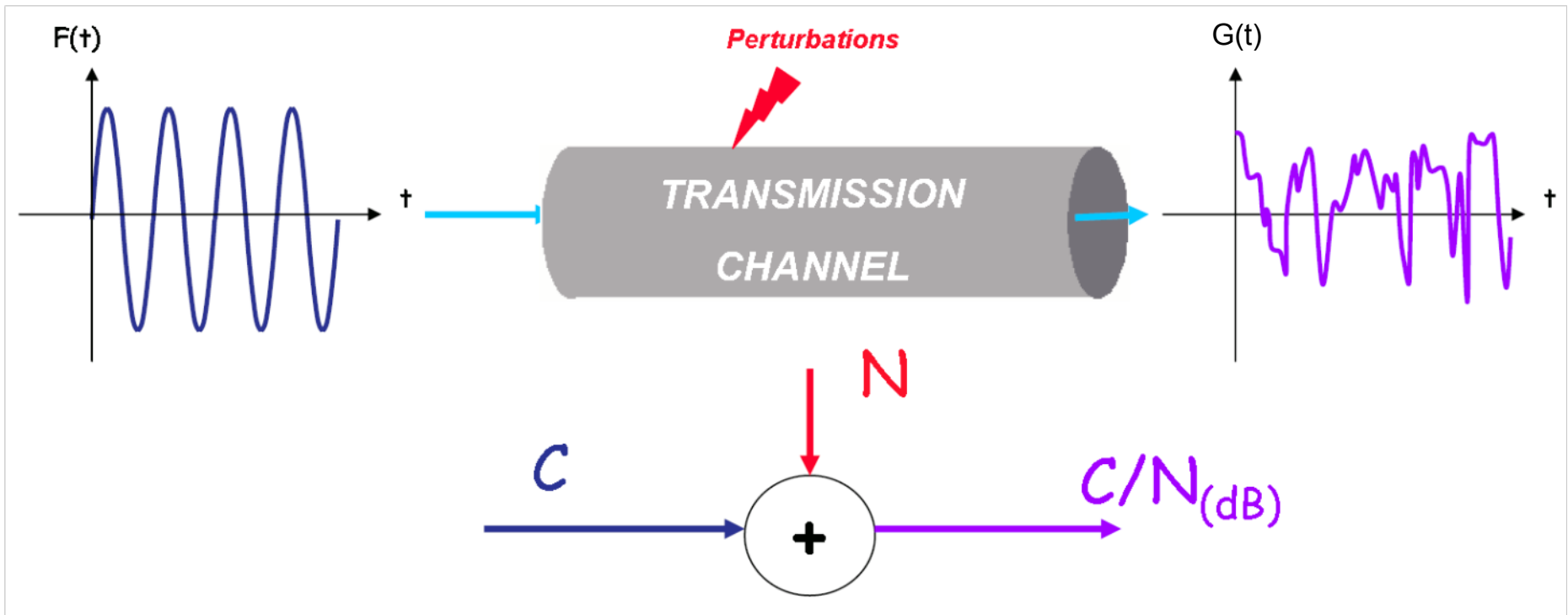
Smetnje u komunikacijskom kanalu

- šum

- šum se može definirati kao neželjeni signal koji se pojavljuje u isto vrijeme, na istom mjestu ili u istom frekvencijskom području kao i željeni signal
- uvijek je prisutan u komunikacijskim sustavima
- šum se pojavljuje u različitim oblicima
 - npr. za dva čovjeka koji razgovaraju zvukovi koje proizvodi okolni promet djeluju kao šum i sl.
- u elektroničkim komunikacijskim sustavima pojavljuje se
 - termički ("bijeli") šum
 - intermodulacijski šum
 - preslušavanje
 - impulsni šum



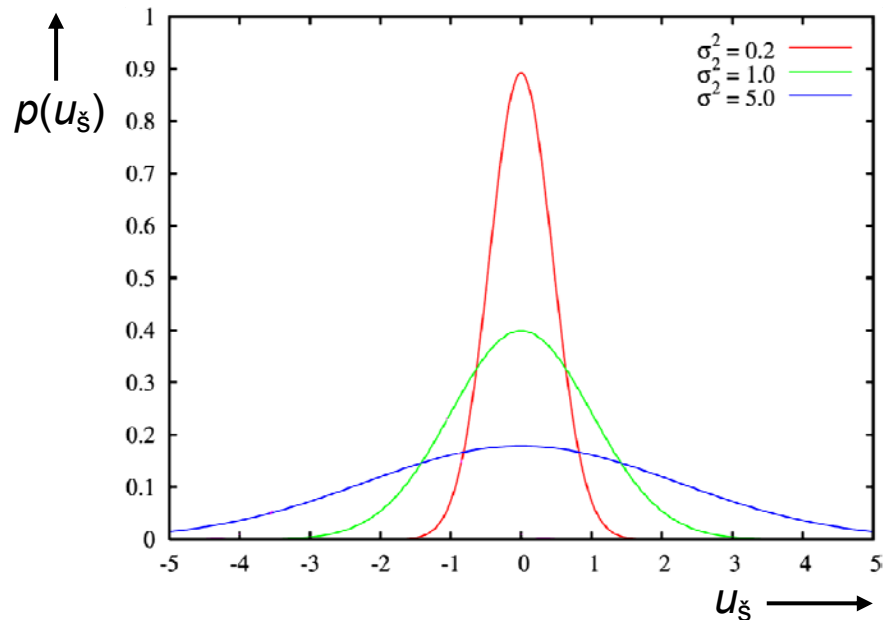
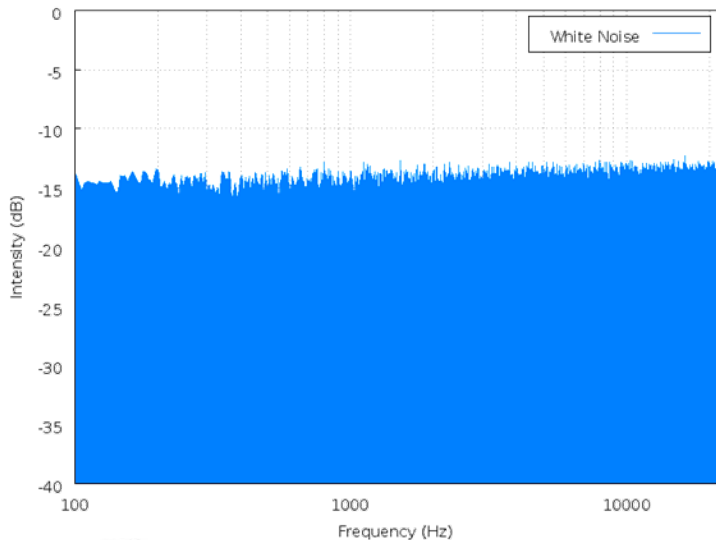
Smetnje u komunikacijskom kanalu



Smetnje u komunikacijskom kanalu

– termički šum

- uzrok mu je gibanje elektrona unutar atoma koje je prisutno u svim materijalima i na svim temperaturama osim apsolutne nule
- uvijek prisutan u elektroničkim komunikacijskim sustavima
- ne može biti uklonjen i postavlja gornju granicu značajki sustava
- ima jednoliku razdiobu snage duž frekvencijskog spektra s Gaussovom razdiobom razina signala ($\sigma \sim U_{\text{š}} \rightarrow$ efektivna vrijednost napona šuma)



Smetnje u komunikacijskom kanalu

- termički šum na širini pojasa od 1 Hz je:

$$N_0 = kT \text{ [W/Hz]}$$

N_0 - gustoća snage šuma u W po 1 Hz širine pojasa

k - Boltzmannova konstanta = $1,3803 \times 10^{-23}$ J/K

T - temperatura u Kelvinima

- termički šum u pojasu frekvencija B Hz je

$$N = kTB \text{ [W]}$$

- može se izraziti u dBW (decibel u odnosu na 1 W)

$$N = 10 \log k + 10 \log T + 10 \log B \text{ [dBW]}$$

$$N = -228,6 + 10 \log T + 10 \log B \text{ [dBW]}$$

- idealni prijamnik je onaj koji ne unosi vlastiti termički šum, dok stvarni prijamnici unose termički šum i povećavaju njegovu ukupnu razinu u signalu

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- intermodulacijski šum
 - rezultat je nastanka novih neželjenih frekvencijskih komponenti kad signali različitih frekvencija dijele isti prijenosni medij
 - uzrok je u nelinearnost elektroničkih sklopova u odašiljaču i prijamniku
- preslušavanje
 - neželjena sprega između putova kojima se signali šire
 - pojavljuje se zbog električne sprege između upletenih parica u istom kabelu, više signala u koaksijalnom kabelu, neželjenih signala primljenih mikrovalnom antenom
 - reda je veličine termičkog šuma
- impulsni šum
 - nekontinuirani šum koji se povremeno pojavljuje u obliku neregularnih impulsa kratkog trajanja i velike amplitude
 - izvori mogu biti sijevanje, mehaničke sklopke, neonska rasvjeta, itd.
 - ne predstavlja problem u analognim sustavima, ali u digitalnim sustavima može izazvati značajne gubitke informacije

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- odnos signal/šum
 - širenjem signala, signal postaje sve slabiji tako da u određenom trenutku razina šuma (koji je najčešće vrlo niska) postaje ograničavajući faktor za realizaciju komunikacije
 - u procjeni utjecaja šuma na značajke komunikacijskog sustava važan je relativni odnos snage signala i snage šuma, a ne njihovi apsolutni iznosi
 - omjer snage signala (S) i snage šuma (N) naziva se odnos signal/šum (S/N , Signal/Noise) i izražava se u decibelima (dB)
$$S/N [\text{dB}] = 10 \log_{10}(S[\text{W}]/N[\text{W}])$$
 - pravilo da je odnos signala i šuma značajan za realizaciju komunikacije poznato je i iz svakodnevnog života
 - npr. kada dva čovjeka razgovaraju u bučnoj prostoriji oni moraju govoriti glasnije nego u tihoj prostoriji kako bi odnos između govora i pozadinskog šuma ostao isti
 - u elektroničkim komunikacijama ukoliko je snaga prijemnog signala vrlo mala, prijamnik mora imati niski šum, a ako je šum prijamnika visok snaga prijemnog signala mora biti dovoljno velika da se postigne jednaki omjer

Smetnje u komunikacijskom kanalu

- Kvaliteta digitalne informacije na prijamnoj strani određena je prosječnom vjerojatnošću pogreške u prepoznavanju binarnog znaka, bita (BER, *Bit Error Rate* ili *Bit Error Ratio*).
- Taj se parametar naziva i *učestalošću pogreške bita*.
- Pogreška bita nastaje kad postoji razlika između odaslanog bita i iz prijamnika isporučenog bita.
- Ako je u slijedu od N bita nalazi n pogrešnih bitova onda je,

$$BER = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right).$$

- Pogreške u prijenosu nastaju zbog prevelikih smetnji među simbolima digitalnog signala ili zbog djelovanja šuma koji maskiraju impulse digitalnog signala.

Smetnje u komunikacijskom kanalu

Odaslani podaci: 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0

Izvorni signal



Šum



Signal+šum



Primljeni podaci: 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0

Pogrešni bitovi

Kapacitet kanala

- iskazuje se kao brzina prijenosa u bitima u sekundi [bit/s]
 - najveća brzina kojom se mogu prenositi podaci
- kapacitet kanala ovisi o frekvencijskoj širini pojasa B izraženoj u Hz
 - ovisi o parametrima odašiljača i vrsti prijenosnog medija
- na kapacitet kanala utječe
 - broj naponskih razina signala
 - srednja razina šuma u kanalu
 - potrebna vjerojatnost pogreške bita (BER, *Bit Error Rate*)
- u digitalnima komunikacijskim sustavima cilj je u određenoj frekvencijskoj širini pojasa postići što veću brzinu prijenosa uz ograničenu vjerojatnost pogreške bita

Kapacitet kanala — Nyquistova formula

- pretpostavlja kanal bez šuma
- za prijenos binarnog signala (dvije naponske razine) u frekvencijskom pojasu širine B najveća moguća brzina prijenosa je $2B$

$$C = 2B \text{ [bit/s]}$$

- ukoliko signal može poprimiti M naponskih razina kapacitet kanala je

$$C = 2B \log_2 M \text{ [bit/s]}$$

- za danu frekvencijsku širinu pojasa, kapacitet kanala raste porastom broja mogućih naponskih razina
- realne vrijednosti za M su ograničene šumom i smetnjama u kanalu

Kapacitet kanala — Shannonova formula

- *Shannon* je odredio teorijsku najvišu moguću brzinu pouzdanog prijenosa informacije u zadanome pojasu frekvencija u uvjetima djelovanja bijelog šuma. Ta bi se brzina ostvarila optimalnom obradom informacije (kodiranjem i modulacijom).
- Teorijski najveća ostvariva brzina prijenosa bita ili *kapacitet kanala* jednaka je,

$$\mathcal{C} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \text{ bit/s},$$

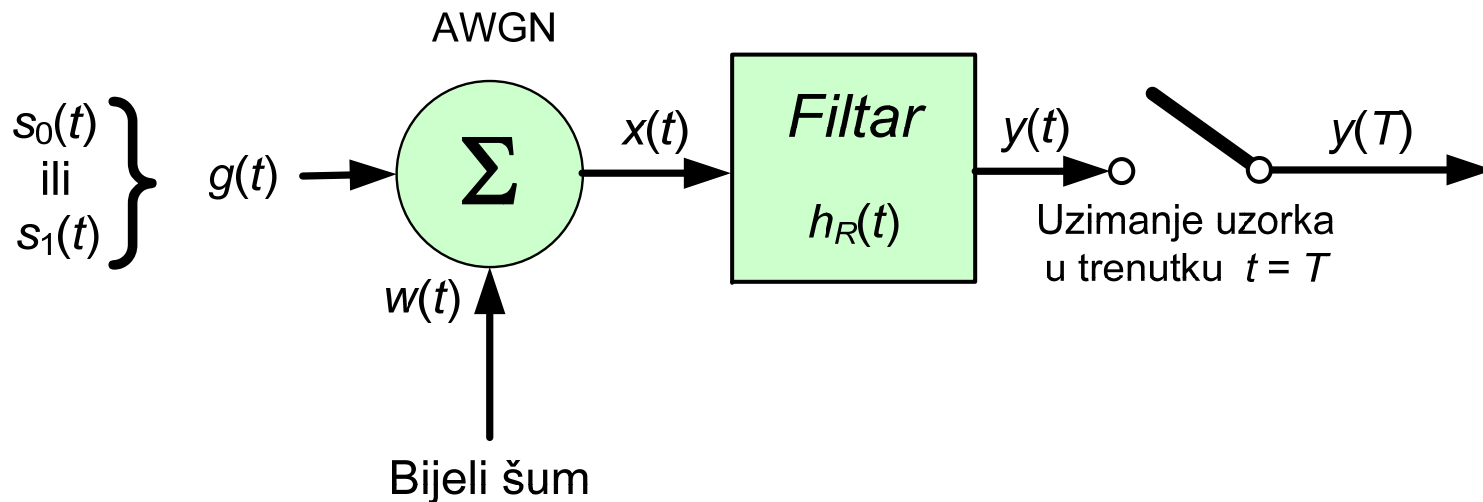
gdje je B širina pojasa koji zauzima kanal, S srednja snaga signala i N snaga bijelog šuma u pojasu širine B . **S/N je omjer snaga u apsolutnom iznosu** (nije iskazan u dB).

- Prema Shannonu pri toj brzini ne nastaju pogreške.
- Izraz pokazuje da se smanjenjem širine kanala povećava potrební omjer signala i šuma, a da bi se zadržao nepromijenjeni kapacitet kanala.
- *Primjer:* Analogni telefonski širine pojasa 3,1 kHz ima omjer $C/N = 40$ dB. Prema Shannonu kapacitet tog kanala iznosi $\mathcal{C} = 41,168$ kbit/s.

Optimalni prijam, utjecaj šuma na digitalne signale

Optimalni prijam — prilagođeni filter

- Temeljna je zadaća prijama detektirati impuls prenesen komunikacijskim kanalom koji je izložen djelovanju šuma. Pretpostavlja se aditivni bijeli šum (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).



- Na ulaz u prijamni filter impulsnog odziva $h_R(t)$ dolazi signal $x(t)$ koji se sastoji od impulsa odaslanog signala $g(t)$ i superponiranog signala bijelog šuma $w(t)$,

$$x(t) = g(t) + w(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad T - \text{vremenski interval promatranja.}$$

Optimalni prijam — prilagođeni filter

- Funkcija $w(t)$ opisuje uzorke bijelog šuma koji je srednje vrijednosti nula i spektralne gustoće snage N_0 .
- Optimizacija prijama sastoji se od projektiranja prijamnog filtra kojim će se minimizirati učinci šuma na izlazu filtra i tako poboljšati detekcija impulsa $g(t)$.
- Kako je filter linearnih osobina na njegovu je izlazu signal,

$$y(t) = g_o(t) + n(t),$$

gdje su $g_o(t)$ i $n(t)$ komponente izlaznog signala filtra što su ih stvorile odgovarajuće ulazne komponente $g(t)$ i $w(t)$.

- U svrhu optimizacije detekcije potrebno je snagu $g_o(t)$ u trenutku $t = T$ učiniti što većom u odnosu na snagu izlaznog šuma $n(t)$.

Optimalni prijam — prilagođeni filter

- Optimalna prijenosna funkcija prijamnog filtra $H_{\text{Ropt}}(f)$ dobiva se u obliku,

$$H_{\text{Ropt}}(f) = k \cdot G^*(f) e^{-j2\pi f T},$$

gdje $G(f)$ označuje funkciju spektra signala $g(t)$, a k je neka konstanta.

- Izuzme li se faktor razmjernosti $k \cdot e^{-j2\pi f T}$, *prijenosna funkcija optimalnog filtra odgovara konjugirano kompleksnoj funkciji Fourierove transformacije signala ulaznog impulsa.*
- Inverznom Fourierovom transformacijom $H_{\text{Ropt}}(f)$ dobiva se impulsni odziv optimalnog filtra,

$$h_{\text{Ropt}}(t) = k \int_{-\infty}^{\infty} G^*(f) e^{-j2\pi f (T-t)} df.$$

Optimalni prijam — prilagođeni filter

$$h_{\text{Ropt}}(t) = k \int_{-\infty}^{\infty} G^*(f) e^{-j2\pi f(T-t)} df.$$

- Kako je: $G^*(f) = G(-f)$, izlazi,

$$\begin{aligned} h_{\text{Ropt}}(t) &= k \int_{-\infty}^{\infty} G(-f) e^{-j2\pi f(T-t)} df, \\ &= k \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi f(T-t)} df, \\ &= k \cdot g(T-t). \end{aligned}$$

- Impulsni odziv optimalnog filtra odgovara, dakle, vremenski zaokrenutom i pomaknutom ulaznom signalu $g(t)$.
- Odziv filtra prilagođen je ulaznom signalu i on se zato naziva *prilagođenim filtrom*.

Utjecaj šuma

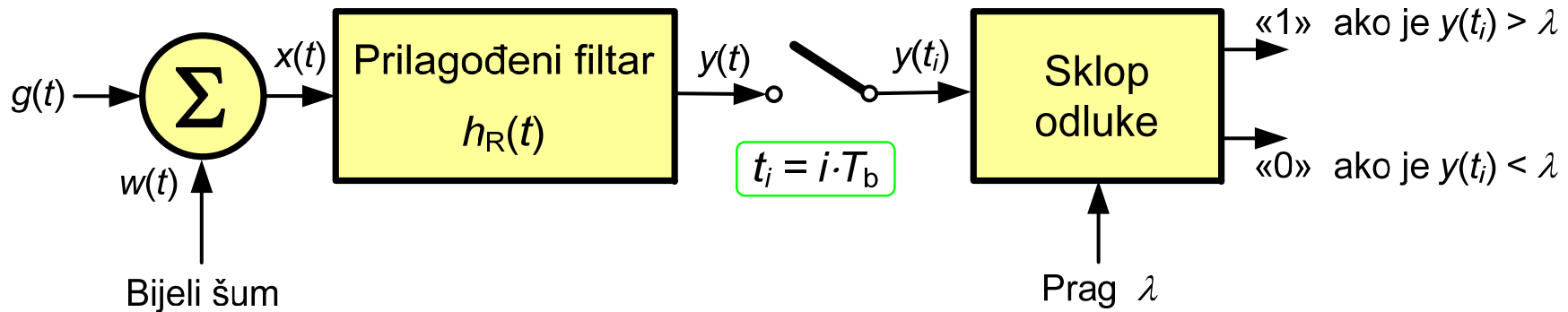
- U digitalnom se prijenosu umjesto omjera snaga korisnog signala i šuma koristi omjer energije signala po bitu (energija simbola) i gustoće snage šuma E_b/N_0 .
- Taj je omjer bez dimenzije kao i S/N , jer se E_b mjeri u Ws, a N_0 u W/Hz.
- Neka je digitalni signal $g(t)$ predodređen idealnima bipolarnim pravokutnim impulsima NRZ linijskog koda.

$$g(t) = \begin{cases} +A, & \text{ako je odaslan znak "1" [simbol } s_1(t)], \\ -A, & \text{ako je odaslan znak "0" [simbol } s_0(t)], \end{cases}$$

$$0 \leq t < T_b.$$

- Oblik primljenih impulsa $x(t)$ nije više pravokutan, jer se na $g(t)$ superponira bijeli Gaussov šum $w(t)$, srednje vrijednosti nula i spektralne gustoće snage N_0 ,

Utjecaj šuma



$$x(t) = \begin{cases} +A + w(t), & \text{za znak "1",} \\ -A + w(t), & \text{za znak "0",} \end{cases} \\ 0 \leq t < T_b.$$

- U svakom intervalu trajanja T_b prijamnik mora donijeti odluku o tome da li je odaslan znak «1» ili znak «0».
- Ako je razina izlaznog signala prilagođenog filtra na kraju intervala bita T_b viša od postavljenog praga λ donosi se odluka *odaslan je znak «1»*. Kad je ta razina niža od λ donosi se odluka *odaslan je znak «0»*.

Utjecaj šuma

- Stupanj utjecaja šuma na vjerojatnost pogrešne detekcije binarnog znaka ovisi o statističkim osobinama šuma.
- Kod bijelog šuma razdioba gustoće vjerojatnosti razine šuma određena je Gaussovom normalnom razdiobom, tj. vjerojatnost da se razina uzorka šuma nalazi između razina u i $u+du$ iznosi,

$$p(u) du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}U_{\text{š}}} e^{-u^2/2U_{\text{š}}^2} du ,$$

pri čemu $U_{\text{š}}$ odgovara efektivnoj vrijednosti napona šuma, ili

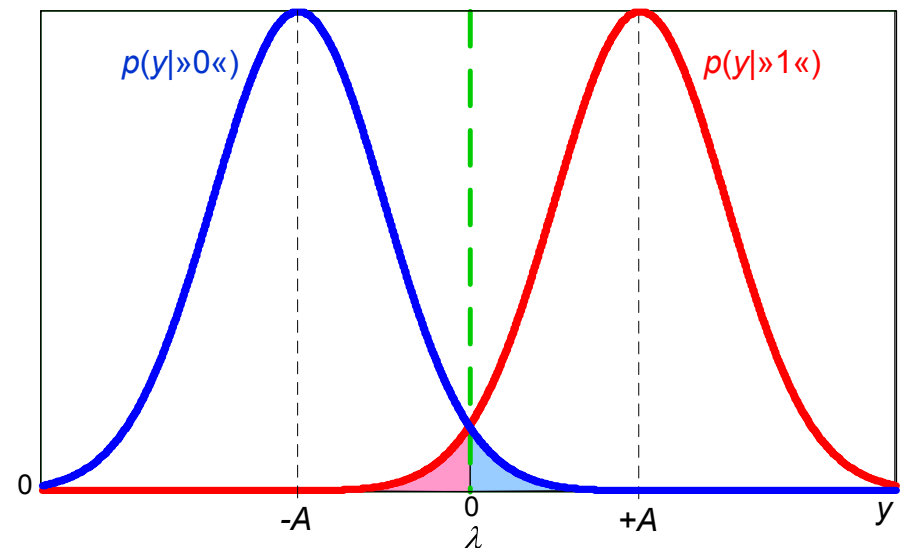
$$U_{\text{š}}^2 = \frac{N_0}{T_b} .$$

Utjecaj šuma

- Pogreška u detekciji binarnog znaka može nastati na dva načina:
 - detektiranjem znaka «1» kad je odaslan znak «0», vjerojatnost p_{10} ili,
 - detektiranjem znaka «0» kad je odaslan znak «1», vjerojatnost p_{01} .
- Kako su to dva ekskluzivna događaja oni se mogu analizirati zasebno.
- Kad je odaslan znak «0» razdioba vjerojatnosti pojedine razine y signala $y(t)$ ima srednju vrijednost $-A$ i jednaka je,

$$p(y|\"0\") = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{\text{š}}^2}} e^{-\frac{(y+A)^2}{2U_{\text{š}}^2}}.$$

- Pogreška nastaje kad je $y > \lambda$, pa je vjerojatnost pogrešne detekcije znaka «0», tj. p_{10} , jednaka,



Utjecaj šuma

$$p_{10} = p(y > \lambda | "0") = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{\text{š}}^2}} \int_{\lambda}^{\infty} e^{-\frac{(y+A)^2}{2U_{\text{š}}^2}} dy.$$

- Ova se vjerojatnost može izraziti uz pomoć tzv. *komplementarne funkcije pogreške* koja je definirana izrazom,

$$\text{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-z^2} dz.$$

- Ako se uvede zamjena,

$$z = \frac{y + A}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}, \text{ to onda daje,}$$

$$p_{10} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{(A+\lambda)/\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}^{\infty} e^{-z^2} dz = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{A+\lambda}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}\right).$$

Utjecaj šuma

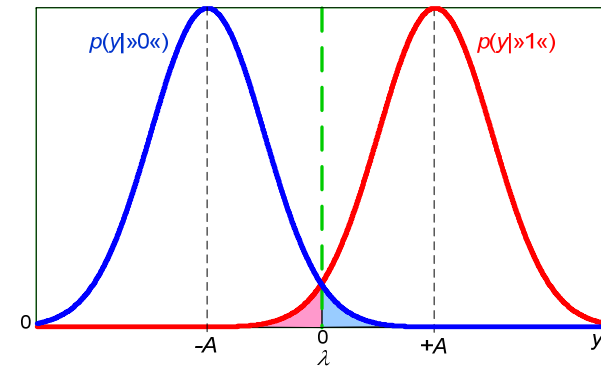
- Na slični se način određuje vjerojatnost pogrešne detekcije znaka «1».

$$p(y|\"1\") = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{\text{š}}^2}} e^{-\frac{(y-A)^2}{2U_{\text{š}}^2}}.$$

$$p_{01} = p(y < \lambda | \"1\") = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{\text{š}}^2}} \int_{-\infty}^{\lambda} e^{-\frac{(y-A)^2}{2U_{\text{š}}^2}} dy.$$

$$z = \frac{A-y}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}},$$

$$p_{01} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{(A-\lambda)/\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}^{\infty} e^{-z^2} dz = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{A-\lambda}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}} \right).$$



Utjecaj šuma

- Kako pojava jedne vrste pogreške isključuje mogućnost pojave druge vrste pogreške onda je ukupna srednja vjerojatnost pogrešne detekcije binarnog znaka odnosno simbola,

$$\begin{aligned}
 p_E &= p_0 p_{10} + p_1 p_{01}, \\
 &= \frac{p_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A + \lambda}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}\right) + \frac{p_1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A - \lambda}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}\right).
 \end{aligned}$$

- Kad su jednake vjerojatnosti pojave znaka «1» i znaka «0» u digitalnom slijedu binarnih znakova (binarno simetrični prijenosni kanal), tj. kad je,

$$p_1 = p_0 = \frac{1}{2},$$

može se pokazati da je optimalna razina praga detekcije $\lambda = 0$, pa izlazi,

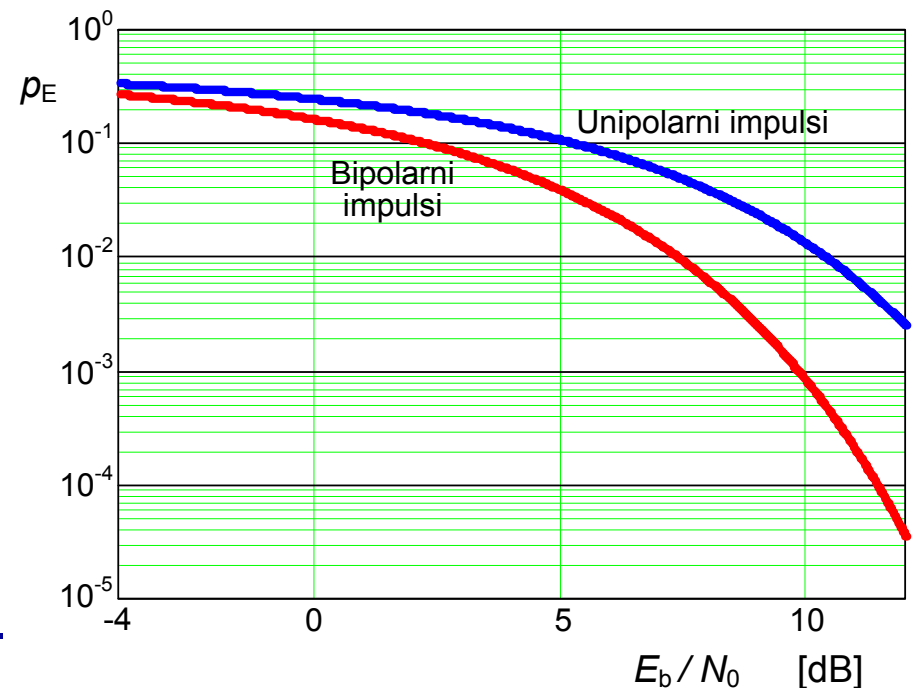
$$p_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2U_{\text{š}}^2}}\right).$$

Utjecaj šuma

- Kako je, $U_{\text{š}}^2 = N_0/T_b$, a energija odaslanog signala po bitu jednaka, $E_b = A^2 T_b$, izlazi da je,

$$p_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right).$$

- Vjerojatnost pogrešne detekcije simbola u binarno simetričnom kanalu ovisi samo o omjeru energije signala po bitu E_b i spektralne gustoće snage šuma N_0 .
- Ekvivalentni postupak za unipolarni NRZ linijski kod digitalnog signala daje,



Utjecaj šuma

$$g(t) = \begin{cases} +A, & \text{ako je odaslan znak "1" [simbol } s_1(t)], \\ 0, & \text{ako je odaslan znak "0" [simbol } s_0(t)], \end{cases} \\ 0 \leq t < T_b.$$

$$x(t) = \begin{cases} +A + w(t), & \text{za znak "1",} \\ w(t), & \text{za znak "0",} \end{cases} \\ 0 \leq t < T_b.$$

$$\lambda = \frac{A}{2},$$

$$p_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0}} \right).$$

Prijenos analognog i digitalnog signala

- analogni sustavi
 - prenose analognu ili digitalnu informaciju
 - kvaliteta prijama ne ovisi o sadržaju signala
 - osjetljivi su na šum i nelinearna izobličenja
 - povećanjem prijenosne udaljenosti raste gušenje signala
 - radi gušenja rabe se pojačala koja pored signala pojačavaju i šum
- digitalni sustavi
 - kvaliteta prijama ovisi o sadržaju signala
 - osjetljivi su na gušenje signala
 - impulsi postaju manji i zaobljeniji
 - manje osjetljivi na šum
 - pojačala regeneriraju izvorni oblik signala i ne pojačavaju šum
 - moguće je rabiti tehnike za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka u prijenosu

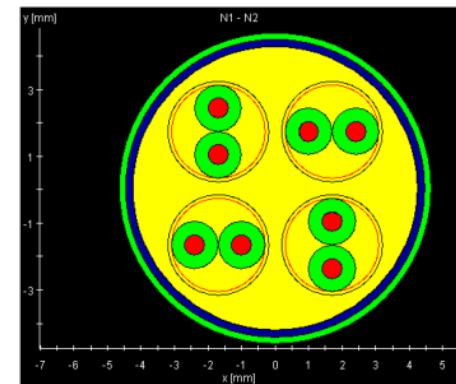
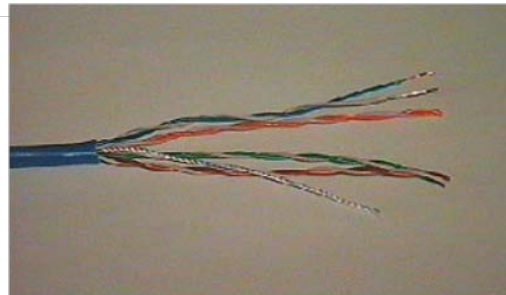
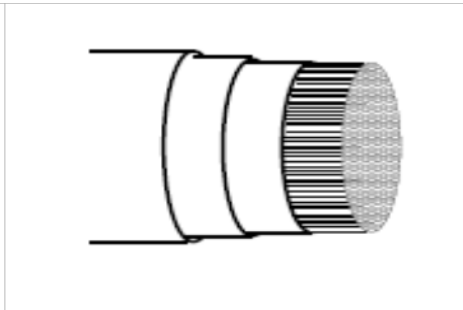
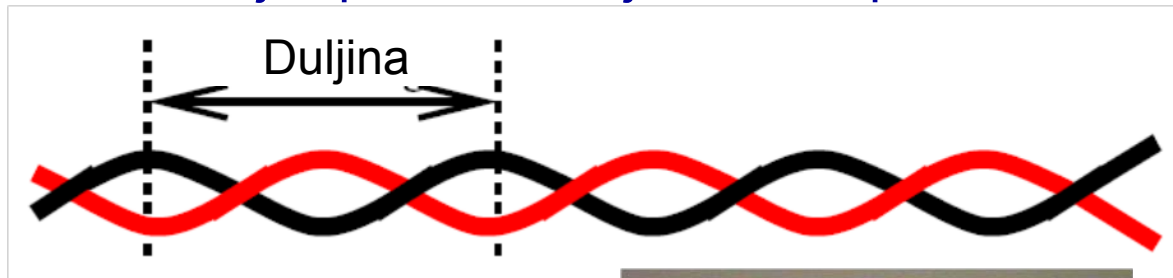
Prednosti digitalnog prijenosa

- visoka kvaliteta prijamnog signala
- jeftiniji sklopovi i uređaji
- moguće je ostvariti veće prijenosne udaljenosti u kanalima niske kvalitete
- bolje iskorištenje prijenosnih kapaciteta i frekvencijskog spektra
- povećana sigurnost i privatnost (šifriranje signala)

Značajke prijenosnih medija

Upletena parica

- dva izolirana vodiča spiralno upletena jedan oko drugog
 - vodiči su upleteni jedan oko drugog radi smanjenja preslušavanja
 - debljina pojedinog vodiča je između 0,4 mm - 0,9 mm
- više tako upletenih parova združuje se u kabel
 - duljina koja definira koliko gusto su vodiči upleteni jedan oko drugog (duljina ispreplitanja) se razlikuje za različite parice u kabelu kako bi se smanjilo preslušavanje između parica



Upletena parica

- rabe se za povezivanje telefonskih pretplatnika na telefonsku centralu te u lokalnim mrežama (LAN)
- većina pripada u kategoriju neoklopljenih kabela (UTP, *Unshielded Twisted Pair*)
 - različite kvalitete kabela
 - kategorija 3
 - brzine prijenosa u LAN do 16 Mbit/s, duljina ispreplitanja 7,5 do 10 cm
 - kategorija 5
 - brzine prijenosa u LAN do 100 Mbit/s, duljina ispreplitanja 0,6 do 0,85 cm
- dobre strane
 - jeftin medij jednostavan za polaganje
- loše strane
 - ograničene brzine prijenosa, ograničene prijenosne udaljenosti, neotpornost na šum i elektromagnetske smetnje

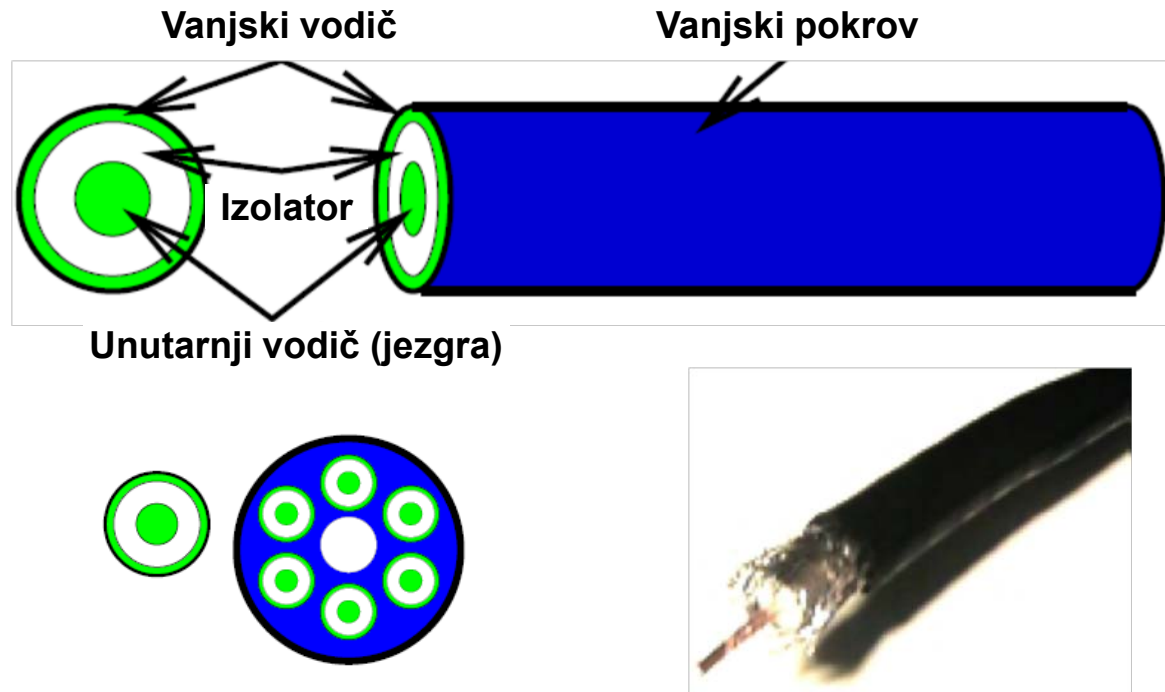
Upletena parica

- kvaliteta kabela određena je gušenjem i preslušavanjem
- preslušavanje se očituje kao sprega signala između parica
 - signal iz jedne parice se pojavljuje u drugoj parici
- gušenje se očituje kao smanjenje razine prijemnog signala
 - radi kompenzacije gušenja rabe se pojačala
 - za prijenos analognog signala pojačala se postavljaju svakih 5 – 6 km
 - za prijenos digitalnog signala regeneratori se postavljaju svakih 2 – 3 km

Frekvencija	Gušenje (dB/100m)	
	Cat 3 UTP	Cat 5 UTP
1 MHz	2.6	2.0
4 MHz	5.6	4.1
16 MHz	13.1	8.2
25MHz		10.4
100MHz		22.0

Koaksijalni kabel

- dva vodiča smještena u istoj osi i odvojena izolatorom
- više kabela može biti združeno

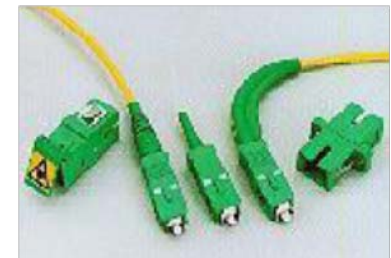
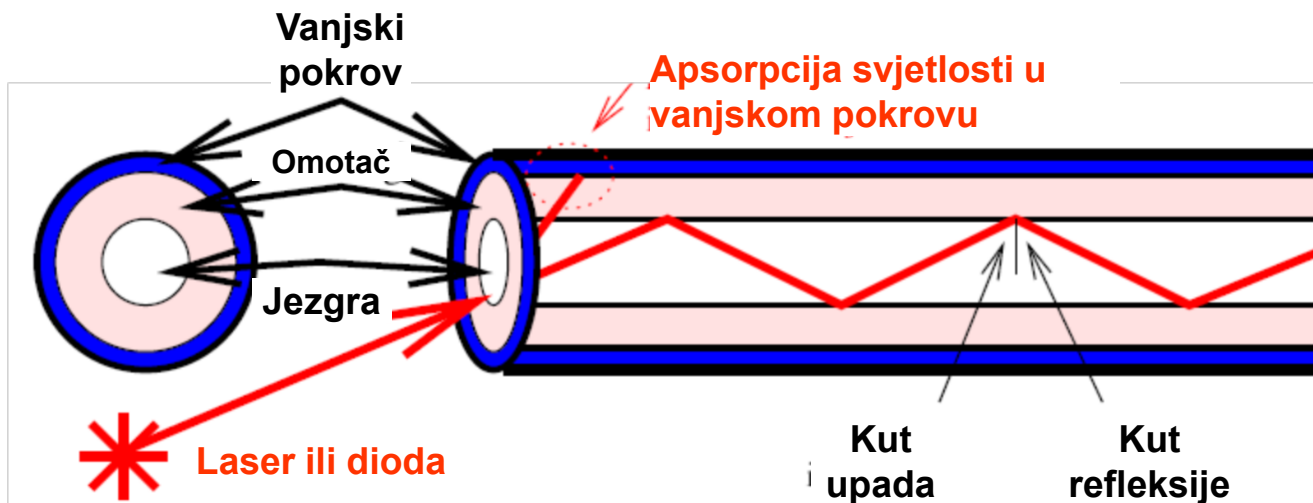


Koaksijalni kabel

- rabi se u sustavima kabelaške televizije te za povezivanje radijskih odašiljača ili prijamnika s antenom
 - prijenos televizijskog signala u frekvencijskom području od 30 – 600 MHz (više od 70 televizijskih kanala)
- prije se rabio u lokalnim mrežama (zamijenjen upletenom paricom) te za prijenos telefonskog signala na velike udaljenosti (zamijenjen optičkim kabelom)
- radi kompenzacije gušenja rabe se pojačala
 - za prijenos analognog signala pojačala se postavljaju svakih par kilometara (ili bliže ako se prenosi područje visokih frekvencija)
 - za prijenos digitalnog signala regeneratori se postavljaju svakih 1 km (ili bliže ako se rabe visoke brzine prijenosa)

Svjetlovod

- svjetlovod je vrlo tanak (2 – 125 μm) i fleksibilan medij
 - ponaša se kao valovod u frekvencijskom području 10^{14} – 10^{15} Hz (područje infracrvene i vidljive svjetlosti)
 - za prijenos se rabe tri optička prozora: 0,85 μm , 1,3 μm i 1,55 μm
 - jezgra koja prenosi svjetlost načinjena je od stakla ili plastike
 - omotač i vanjski pokrov imaju sposobnost apsorpcije svjetlosti
- jedan optički kabel sadrži više svjetlovoda



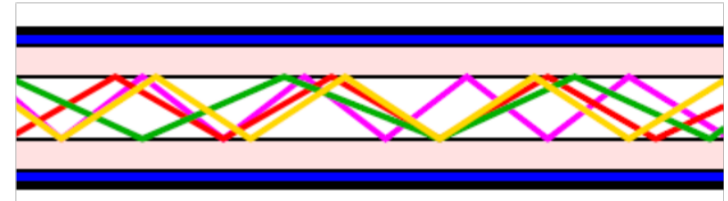
Svjetlovod

- kao izvori svjetlosti rabe se poluvodički laseri ili diode (LED, *Light Emitting Diode*)

	LED	Laser
Brzina prijenosa	Niska	Visoka
Način prijenosa	Višemodni i jednomodni	Višemodni i jednomodni
Udaljenosti	Kratke	Duge
Životni vijek	Dug	Kratak
Temp. ovisnost	Mala	Znatna
Cijena	Niska	Visoka

Svjetlovod

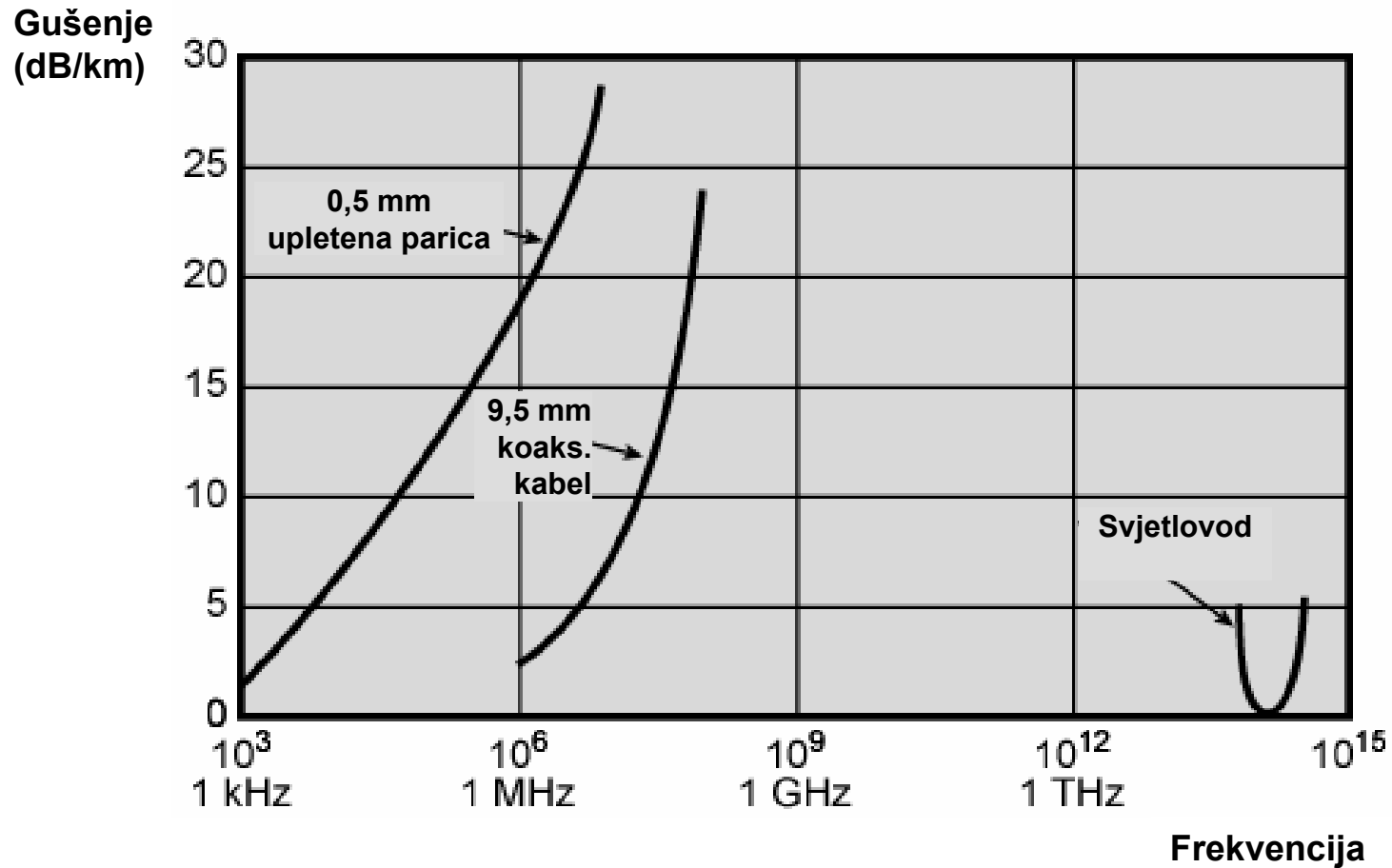
- vrste svjetlovoda
 - višemodni
 - zrake svjetlosti imaju različite putove što izaziva proširenje impulsa
 - promjer jezgre: 50 μm
 - izvori svjetlosti: LED diode
 - jednomodni
 - promjer jezgre: 8 – 12 μm
 - smanjenjem promjera jezgre na red veličine valne duljine samo aksijalna zraka se širi kroz svjetlovod
 - izvori svjetlosti: LED diode i laseri



Svjetlovod

- najčešće se rabi za prijenos signala na velike udaljenosti
- rabi se i u lokalnim mrežama osiguravajući visoke brzine prijenosa
- dobre strane
 - visoke brzine prijenosa (nekoliko stotina Gbit/s)
 - male dimenzije i mala težina
 - malo gušenje signala
 - otpornost na elektromagnetske smetnje
 - potreba za uporabom pojačala svakih desetak kilometara ili više
- loše strane
 - iako su optički kabeli jeftini, ostali uređaji potrebni za elektrooptičku i optoelektričku pretvorbu su relativno skupi
 - složenija instalacija te održavanje sustava

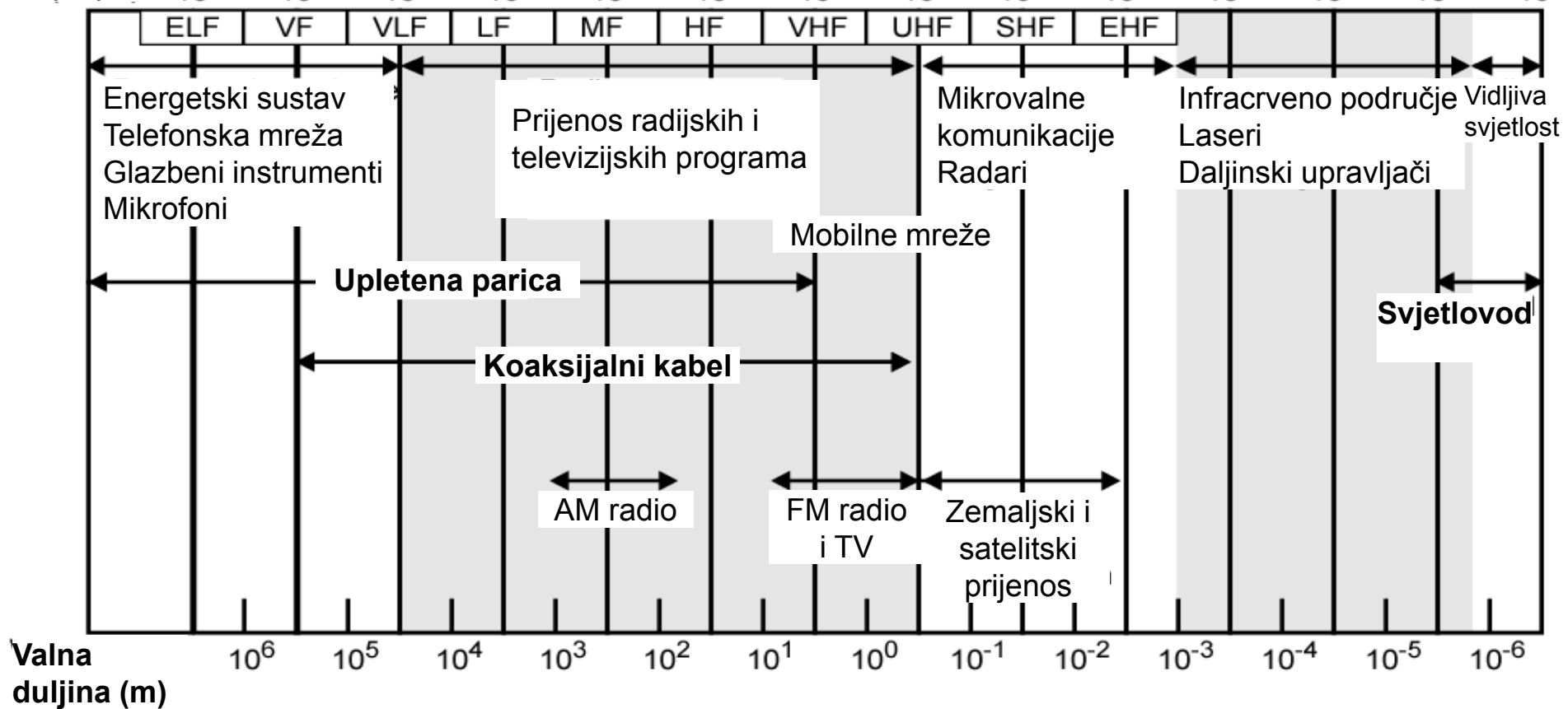
Usporedba vođenih medija



Radijski prijenos

- prijenos informacije se ostvaruje putem elektromagnetskog (EM) vala koji se širi u slobodnom prostoru
- radijski valovi su EM valovi frekvencija od 9 kHz do 3 000 GHz
- temeljni elementi radijskog sustava
 - odašiljač
 - generira visokofrekvencijski prijenosni signal i provodi modulaciju prijenosnog signala informacijom
 - odašiljačka i prijamna antena
 - zrače odnosno primaju elektromagnetski val
 - prijenosni medij
 - atmosfera u blizini površine Zemlje
 - prijamnik
 - odabire željeni kanal (signal), pojačava signal i izdvaja informaciju iz primljenog signala

Frekvencija (Hz)



ELF = Extremely low frequency
 VF = Voice frequency
 VLF = Very low frequency
 LF = Low frequency

MF = Medium frequency
 HF = High frequency
 VHF = Very high frequency

UHF = Ultrahigh frequency
 SHF = Superhigh frequency
 EHF = Extremely high frequency

Radijski prijenos

- frekvencijska podjela radijskih valova

Frekvencija	Skraćenica za naziv pojasa	Valna duljina	Naziv pojasa
3 – 30 kHz	VLF	100 – 10 km	Vrlo niske frekvencije
30 – 300 kHz	LF	10 – 1 km	Niske frekvencije
300 – 3000 kHz	MF	1000 – 100 m	Srednje frekvencije
3 – 30 MHz	HF	100 – 10 m	Visoke frekvencije
30 – 300 MHz	VHF	10 – 1 m	Vrlo visoke frekvencije
300 – 3000 MHz	UHF	100 – 10 cm	Ultravisoke frekvencije
3 – 30 GHz	SHF	10 – 1 cm	Supervisoke frekvencije
30 – 300 GHz	EHF	10 – 1 mm	Ekstremno visoke frekvencije
300 – 3000 GHz	-	1 – 0,1 mm	-

Radijski prijenos

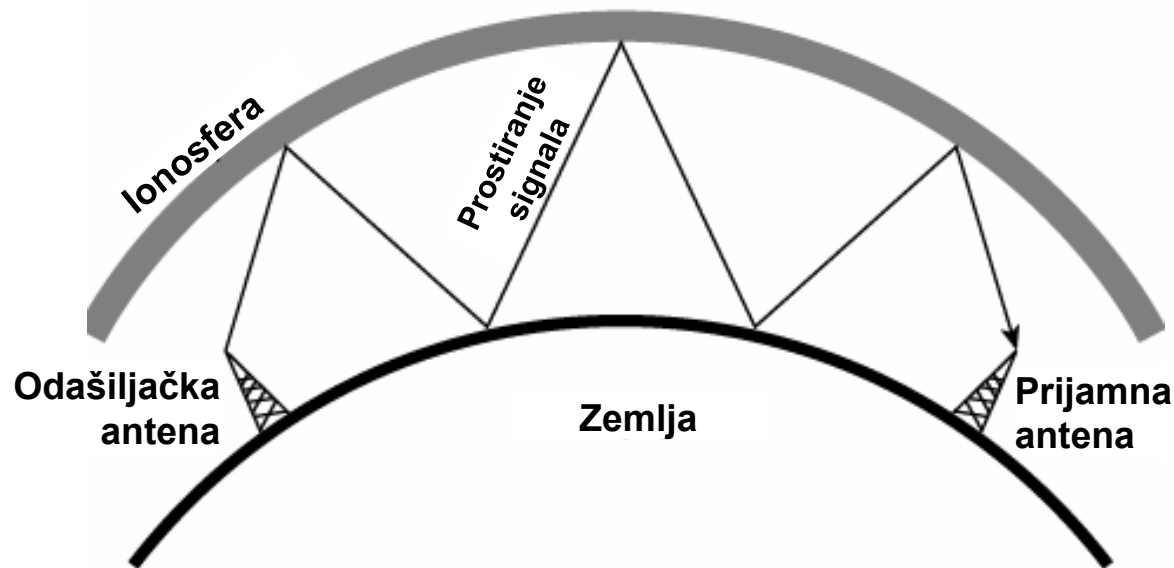
- radijski sustavi razlikuju se u odnosu na frekvencijsko područje, namjenu, vrstu signala koji se prenosi i vrstu korištenoga modulacijskog postupka
- radijski prijenos može biti
 - usmjeren
 - antena zrači uski snop elektromagnetskih valova
 - služi za povezivanje dvije točke, pri čemu odašiljačka i prijamna antena moraju biti točno usmjerene jedna prema drugoj (*point to point*)
 - pogodan za područje viših frekvencija (iznad 1 GHz)
 - neusmjeren
 - odašiljani signal se širi u više smjerova
 - signal jednog odašiljača može biti primljen na velikom broju prijamnika u području pokrivanja odašiljača

Radijski prijenos

- frekvencijska područja i njihova uporaba
 - 30 MHz – 2 GHz
 - uglavnom neusmjereni prijenos radijskih i televizijskih signala od pojedinog odašiljača do velikog broja prijamnika u području pokrivanja odašiljača (radiodifuzija), mobilne komunikacije (GSM, UMTS, ...)
 - 2 GHz – 40 GHz
 - područje mikrovalnih frekvencija
 - zemaljske mikrovalne veze za usmjereni prijenos od točke do točke (radiorelejne veze), satelitska radiodifuzija radijskih i televizijskih signala, satelitske usmjerene veze, radijske lokalne mreže (WLAN, *Wireless Local Area Networks*), point-to-multipoint sustavi (FWA, *Fixed Wireless Access*)
 - 3×10^{11} do 2×10^{14} Hz
 - infracrveno područje pogodno za lokalni usmjereni prijenos signala između dvije točke ili više točaka
 - područje u kome rade IR daljinski upravljači televizora

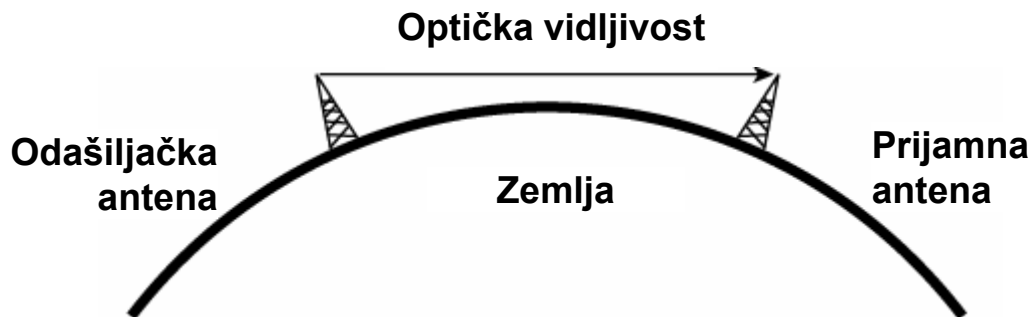
Radijski prijenos

- prostiranje elektromagnetskog vala
 - u području 3 MHz – 30 MHz elektromagnetski val se reflektira od ionosfere



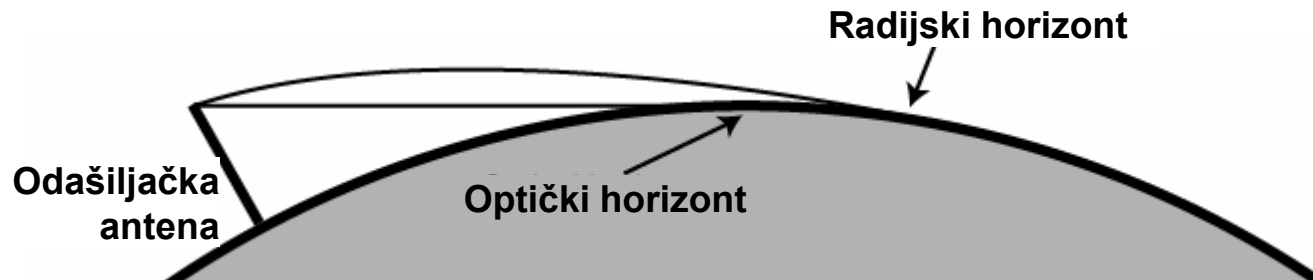
Radijski prijenos

- u području iznad 30 MHz ionosfera je transparentna za elektromagnetske valove
- elektromagnetski val se širi uzduž linije optičke vidljivosti između odašiljačke i prijamne antene (izravni val)
- odašiljačka i prijamna antena se smještaju dovoljno visoko iznad površine zemlje, kako bi se povećao domet



Radijski prijenos

- zbog refrakcije (loma) elektromagnetskog vala domet elektromagnetskog vala je veći od dometa optičke vidljivosti
 - brzina elektromagnetskog vala je funkcija gustoće medija kroz koji se val širi
 - brzina širenja je $3 \cdot 10^8$ m/s u vakuumu, a smanjuje se u drugim medijima
 - pri prijelazu vala iz jednog medija u drugi, mijenja mu se brzina i smjer te se val lomi prema mediju veće gustoće
 - kut refrakcije ovisi o valnoj duljini signala
 - gustoća atmosfere opada porastom visine što izaziva refrakciju elektromagnetskog vala prema Zemlji



Radijski prijenos

- zbog refrakcije (loma) elektromagnetskog vala domet tog vala je veći od dometa optičke vidljivosti
- domet elektromagnetskog vala (d) izražen u kilometrima (km) je

$$d = 3,57\sqrt{Kh}$$

h -visina u m na kojoj se nalazi antena

K -faktor koji izražava činjenicu da elektromagnetski val u mikrovalnom području nema ravnu već savinutu putanju zbog čega putuje do udaljenosti koja je veća od optičke vidljivosti

- $K = 1$ za optičku vidljivost,
- $K = 4/3$ za radijski horizont
- ako se koriste dvije antene visina h_1 i h_2 , one mogu biti udaljene za

$$d = 3,57\left(\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2}\right)$$

- npr. odašiljačka i prijamna antena na visinama 100 m mogu biti udaljene

$$d = 3,57 \cdot 2\sqrt{1,33 \cdot 100} = 7,14\sqrt{133} = 82 \text{ km}$$

Radijski prijenos

- smetnje u radijskom prijenosu
 - porastom frekvencije raste širina pojasa i brzina prijenosa, koje se mogu koristiti, ali se smanjuje najveća prijenosna udaljenost zbog gušenja signala koje raste porastom frekvencije
 - gubici u slobodnom prostoru
 - gušenje signala valne duljine λ na udaljenosti d zbog gubitaka u slobodnom prostoru iznosi

$$L = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \text{ dB}$$
 - pri svakom udvostručenju udaljenosti ili frekvencije gušenje raste za 6 dB
 - npr. za signal frekvencije 30 MHz na udaljenosti 30 km gubici su:

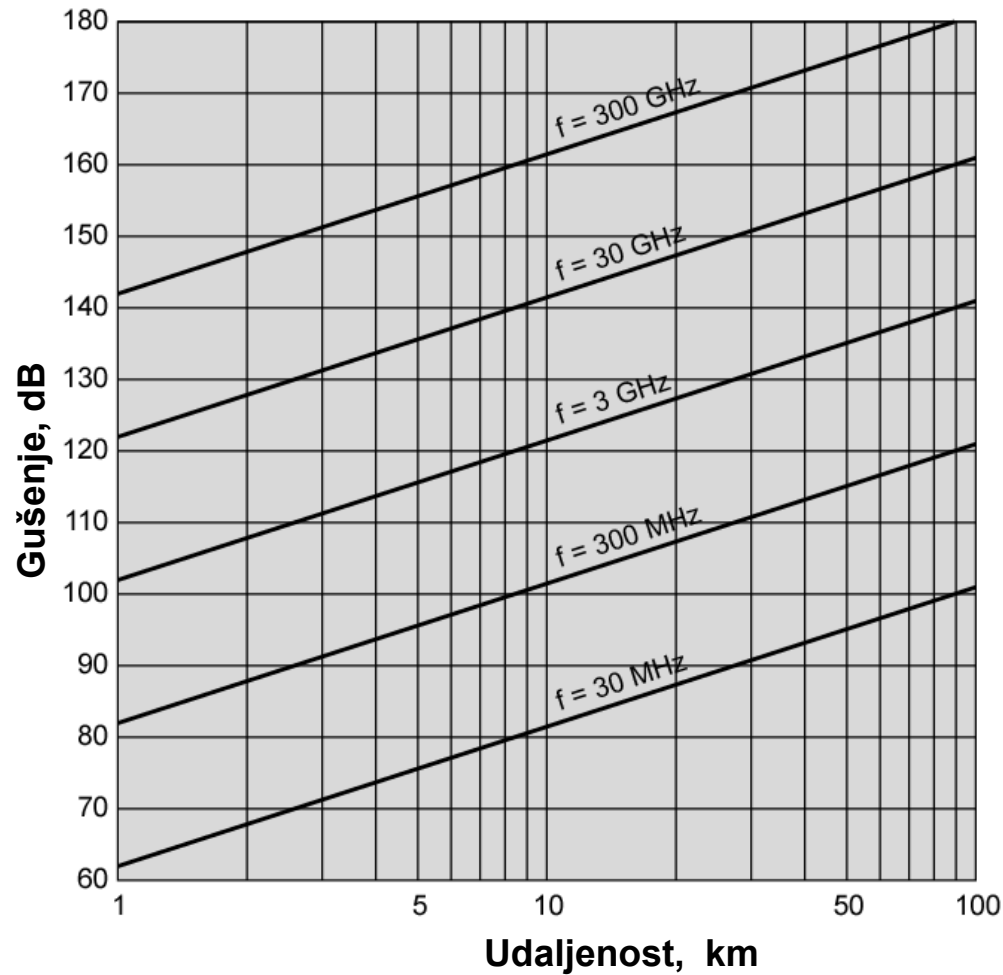
$$\lambda = (3 \cdot 10^8) / (30 \cdot 10^6) = 10 \text{ m}$$

$$L = 10 \log (4\pi \cdot 30\,000 / 10)^2 = 91,52 \text{ dB}$$
 - za signal frekvencije 30 MHz na udaljenosti 60 km gubici su:

$$L = 10 \log (4\pi \cdot 60\,000 / 10)^2 = 97,52 \text{ dB}$$

Radijski prijenos

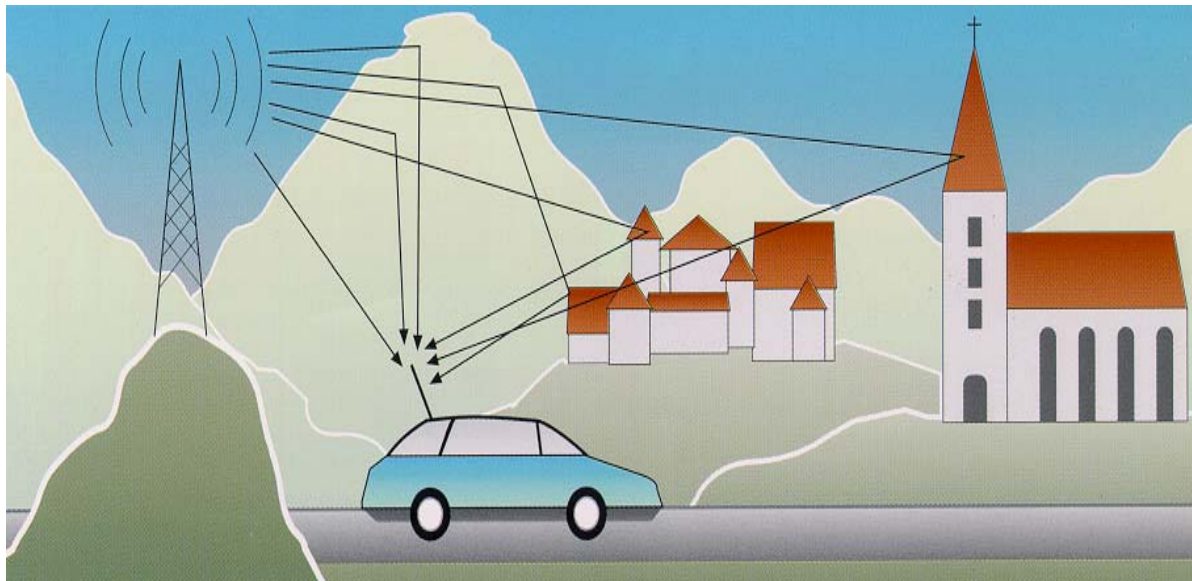
- gubici u slobodnom prostoru



$$L = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \text{ dB}$$

Radijski prijenos

- smetnje zbog višestaznog širenja vala
 - smetnje izazivaju refleksije signala zbog koje više kopija istog signala dolazi do mjesta prijama različitim stazama (višestazno širenje ili višestruko prostiranje) izazivajući smetnje u prijemu
- u području radijskih frekvencija javlja se problem smetnji među signalima tako da je dodjela i uporaba frekvencija strogo planirana i nadzirana



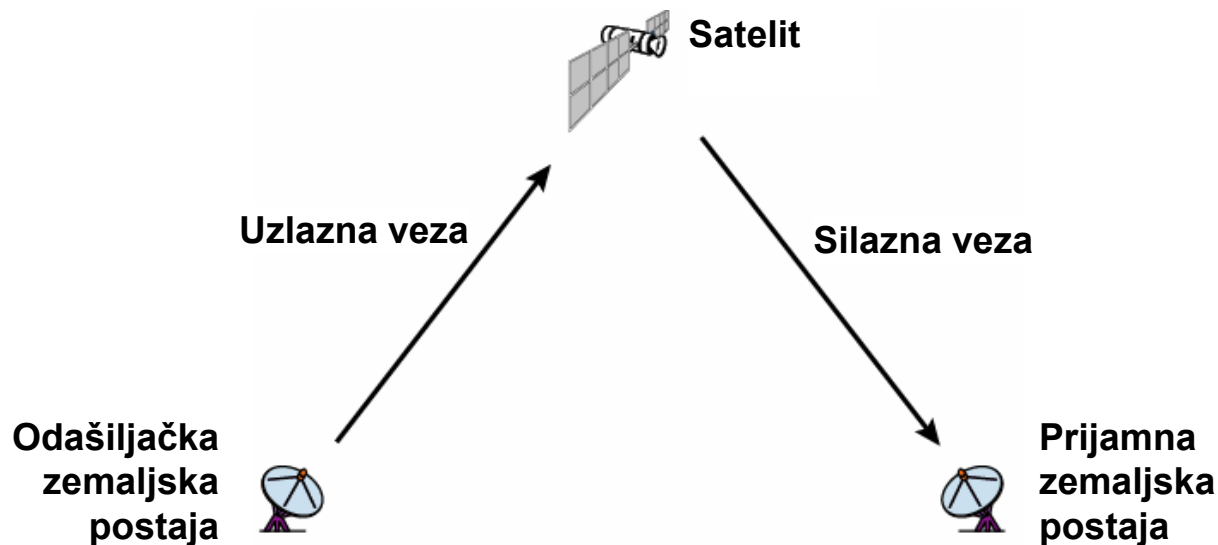
Radijski prijenos

- zemaljske mikrovalne veze
 - frekvencijsko područje je 2 GHz – 40 GHz
 - odašiljačka i prijamna antena su fiksno usmjerene jedna prema drugoj uzduž linije optičke vidljivosti
 - rabe se parabolične antene promjera do oko 3m i širine snopa oko 1°
 - primljeni signal na određenoj lokaciji se može dalje odašiljati do prijamnika na drugoj udaljenoj lokaciji
 - povezivanjem pojedinih veza u sustav radiorelejnih veza može se ostvariti prijenos na vrlo velike udaljenosti



Radijski prijenos

- satelitske usmjerene veze
 - komunikacijski satelit je radiorelejna postaja koja prima signal od jedne zemaljske postaje i odašilje ga prema drugoj zemaljskoj postaji
 - zbog duljine uzlazne i silazne veze kašnjenje signala je značajno i ovisi o visini na kojoj se nalazi satelit



Radijski prijenos

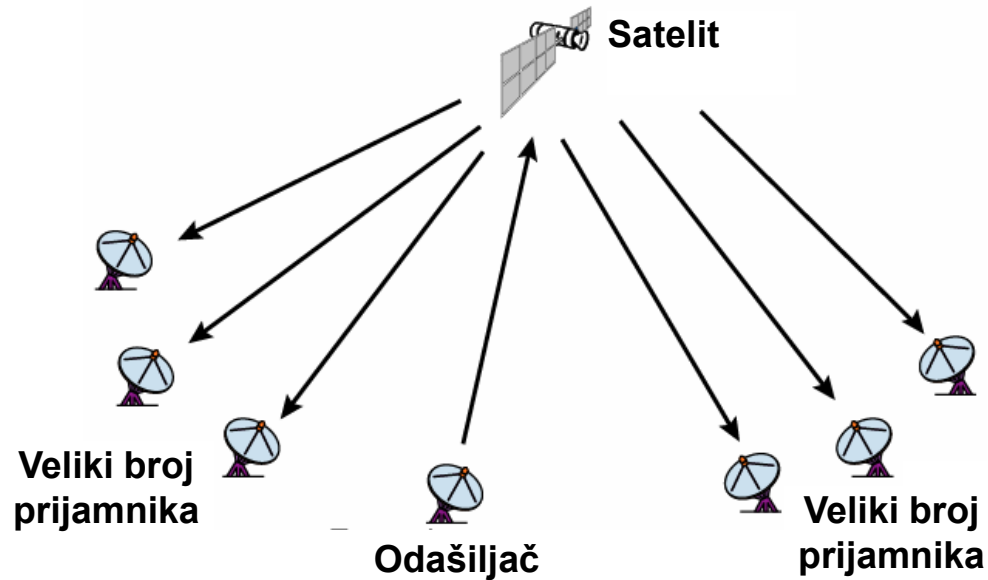
- sateliti
 - GEO (*Geostationary*)
 - smješteni su u geostacionarnoj orbiti na visini 35 784 km
 - pojedini satelit stalno pokriva određeno područje na površini Zemlje
 - kako bi se izbjegle smetnje sateliti ne smiju biti preblizu jedan drugom što ograničava mogući broj satelita u geostacionarnoj orbiti
 - za globalno pokrivanje potrebna su 3 satelita
 - zbog dužine uzlazne i silazne veze kašnjenje signala iznosi oko 270 ms
 - MEO (*Medium-Earth Orbit*)
 - smješteni su na visini 2 000 – 5 000 km iznad površine Zemlje
 - područje pokrivanja satelita na površini Zemlje se mijenja
 - za globalno pokrivanje potrebno je 10 satelita
 - zbog dužine uzlazne i silazne veze kašnjenje signala iznosi 35 – 85 ms
 - LEO (*Low-Earth Orbit*)
 - smješteni su na visini manjoj od 2 000 km iznad površine Zemlje
 - za globalno pokrivanje potrebno je 50 satelita
 - kašnjenje signala iznosi 1 – 7 ms

Radijski prijenos

- uzlazna veza prema satelitu (*uplink*) i silazna veza od satelita (*downlink*) rabe različite frekvencijske pojaseve za prijenos signala
- pojedini satelit može podržavati veći broj veza u različitim frekvencijskim pojasevima, a dio opreme satelita za svaku pojedinu vezu naziva se *transponder*
- za satelitske usmjerene veze najčešće se rabi
 - C - pojas
 - 5,925 – 6,425 GHz za uzlaznu vezu
 - 4,2 – 4,7 GHz za silaznu vezu
 - Ka - pojas
 - 27,5 – 30,5 GHz za uzlaznu vezu
 - 17,7 – 21,7 GHz za silaznu vezu

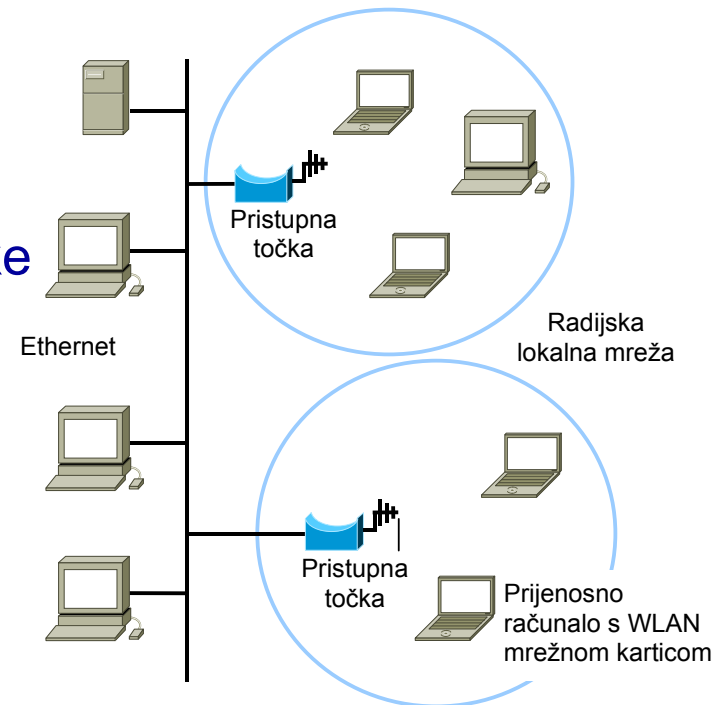
Radijski prijenos

- satelitska radiodifuzija radijskih i televizijskih programa
 - Ku - pojas
 - 14,0 – 14,5 GHz za uzlaznu vezu
 - 11,7 – 12,2 GHz za silaznu vezu



Radijski prijenos

- radijske lokalne mreže (WLAN, *Wireless Local Area Network*)
 - kombiniraju radijski pristup mreži i mobilno računarstvo, omogućavajući prijenos podataka visokim brzinama na kratke udaljenosti
 - najčešće rabe nelicencirane frekvencijske pojaseve radijskog spektra namijenjene industriji, znanosti i medicini (ISM, *Industrial, Scientific and Medical Applications*)
 - za rad WLAN mreža najčešće se rabi ISM pojas oko 2,4 GHz (2400–2483,5 MHz)



Radijski prijenos

- zemaljska radiodifuzija radijskih i televizijskih programa
 - za odašiljanje TV signala mrežom zemaljskih odašiljača (radijska služba radiodifuzije televizijskog signala) rabe se četiri frekvencijska pojasa koja se označavaju kao
 - VHF I (*Very High Frequency*): 47 – 68 MHz
 - VHF III: 174 – 230 MHz
 - UHF IV (*Ultra High Frequency*): 470 – 582 MHz
 - UHF V: 582 – 862 MHz
 - u pojasu VHF širina kanala je 7 MHz, a u pojasu UHF širina je 8 MHz
 - za FM radiodifuziju analognih radijskih programa rabi se frekvencijski pojas VHF II: 87,5 – 108,0 MHz
 - širina kanala je 300 kHz
 - radiodifuzija analognih radijskih programa obavlja se i na nižim frekvencijama: dugi val (nema u HR), srednji val i kratki val