

UTICAJ ŠIRINE PROPUSNOG OPSEGA IDEALNOG SISTEMA ZA PRENOS NA TALASNI OBLIK PRENOŠENOG SIGNALA

Osnovna pretpostavka u razmatranjima idealnih sistema za prenos bila je da signal ima ograničen spektar i da se granice učestanosti u kome se on nalazi ***poklapaju sa graničnim učestanostima sistema za prenos.***

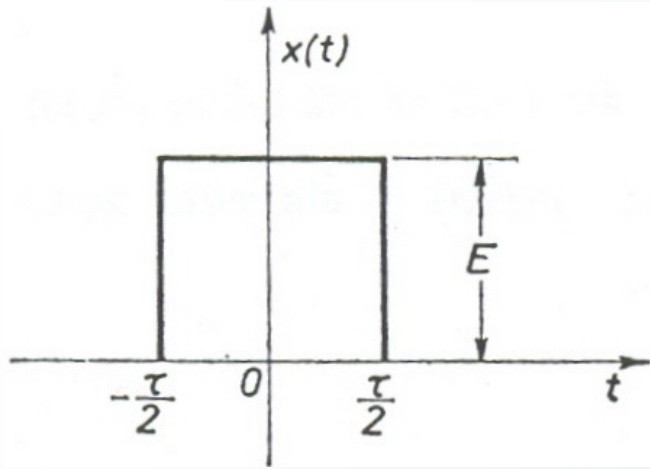
Razmatrajmo situaciju kada se signal prenosi kroz idealan linearni sistem pri čemu gore navedeni uslov nije ispunjen (odnosno propusni opseg sistema je manji od širine spektra signala).

1. PROPUSNIK NISKIH UČESTANOSTI

Posmatrajmo idealan sistem za prenos koji propušta samo komponente niskih učestanosti. Njegova funkcija prenosa je data izrazom:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)}$$
$$A(\omega) = \begin{cases} A = \text{const} & |\omega| < \omega_N \\ 0 & |\omega| > \omega_N \end{cases}, \quad \theta(\omega) = \omega t_0$$

Neka na ulaz sistema dolazi pravougaoni impuls:



$$X(j\omega) = \tau E \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}}$$

$$Y(j\omega) = \begin{cases} \tau E \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} A e^{-j\omega t_0} & |\omega| < \omega_N \\ 0 & |\omega| > \omega_N \end{cases}$$

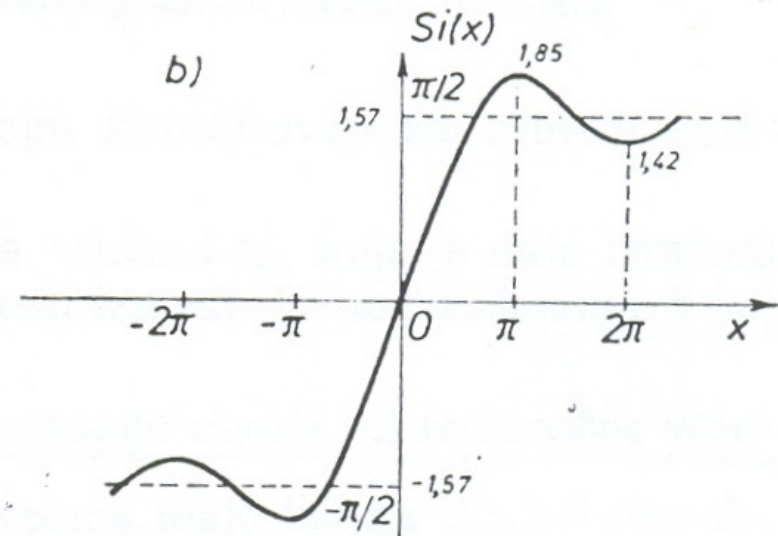
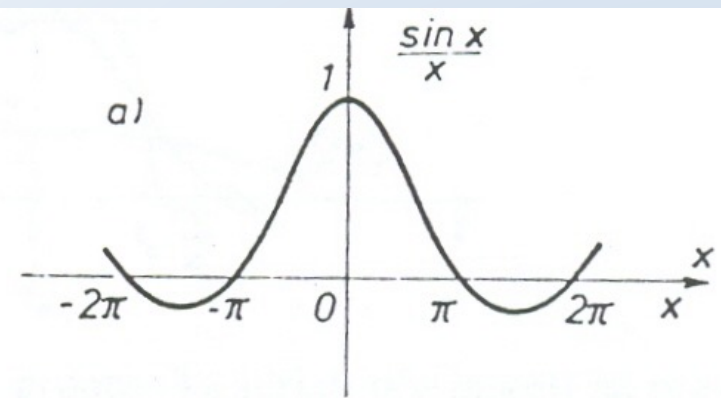
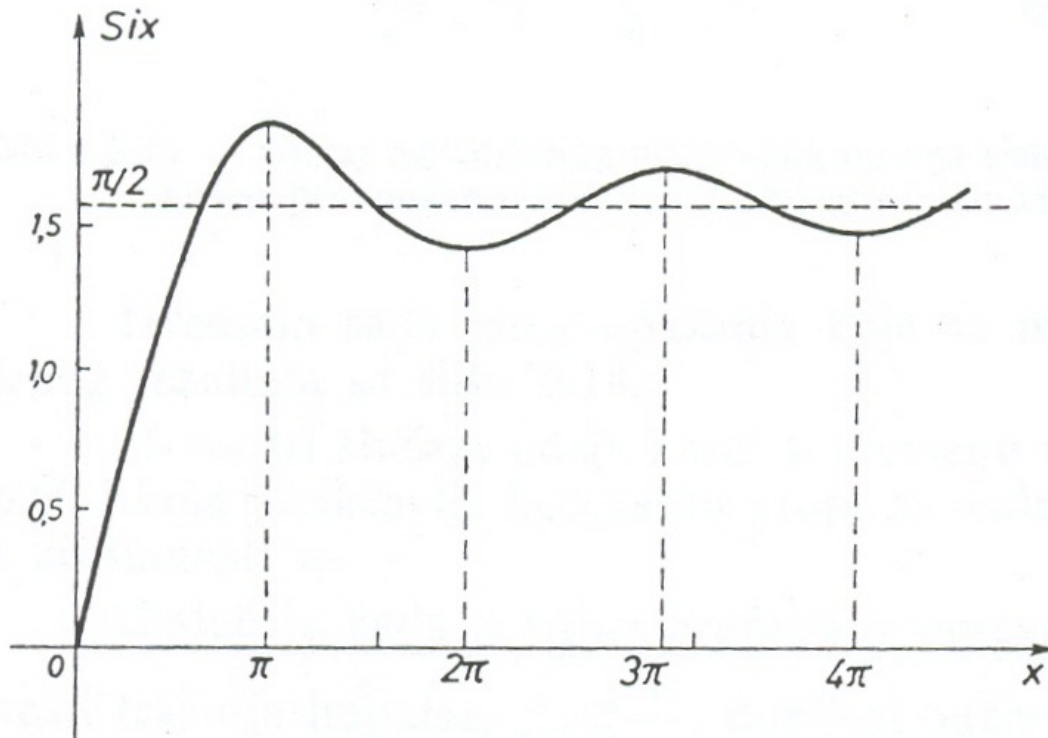
$$y(t) = \frac{AE\tau}{2\pi} \int_{-\omega_N}^{\omega_N} \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} \cos \omega(t-t_0) d\omega = \frac{AE\tau}{2\pi} \int_{-\omega_N}^{\omega_N} \left(\frac{\sin \omega \left(t-t_0 + \frac{\tau}{2} \right)}{\frac{\omega\tau}{2}} - \frac{\sin \omega \left(t-t_0 - \frac{\tau}{2} \right)}{\frac{\omega\tau}{2}} \right) d\omega$$

$$y(t) = \frac{AE}{\pi} \int_0^{\omega_N \left(t-t_0 + \frac{\tau}{2} \right)} \frac{\sin x}{x} dx - \frac{AE}{\pi} \int_0^{\omega_N \left(t-t_0 - \frac{\tau}{2} \right)} \frac{\sin x}{x} dx$$

Integral funkcije $\sin x/x$ ne može da se riješi u zatvorenoj formi, tako da se sa definiše **sinus integral od x** funkcija:

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin x}{x} dx$$

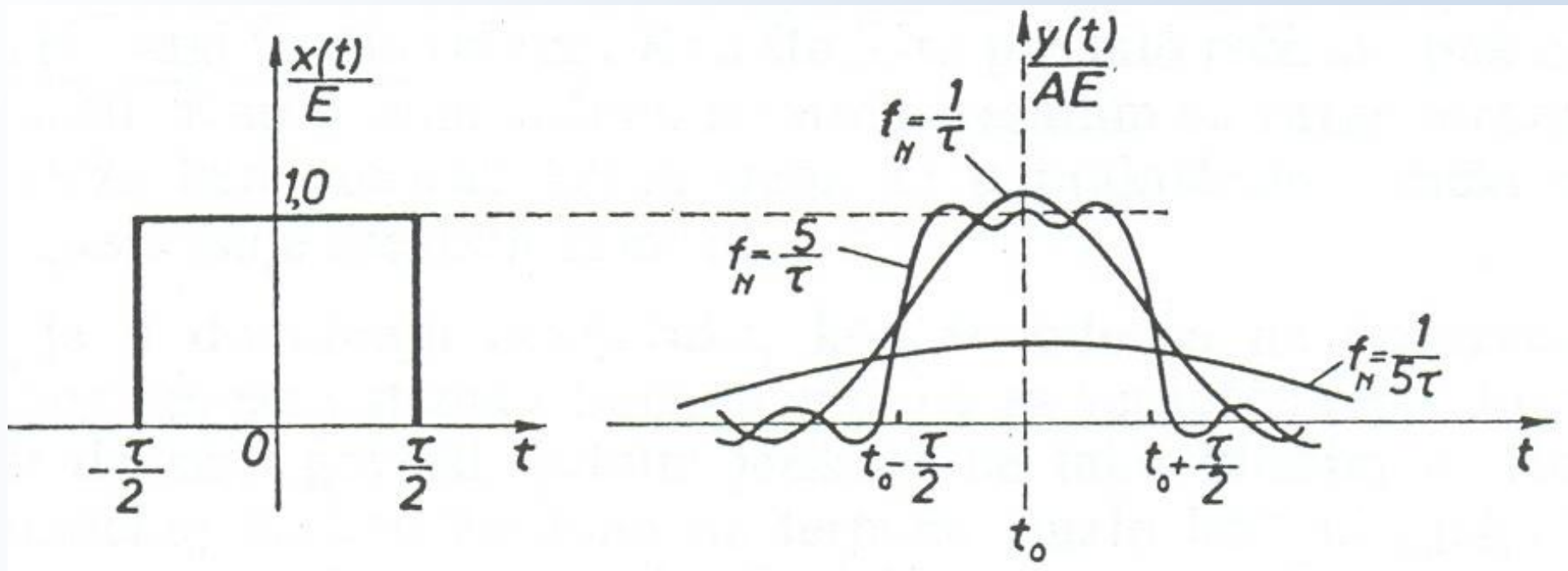
$$Si(-x) = -Si(x)$$



Sada možemo zapisati:

$$y(t) = \frac{AE}{\pi} \left\{ \text{Si} \left[\omega_N \left(t - t_0 + \frac{\tau}{2} \right) \right] - \text{Si} \left[\omega_N \left(t - t_0 - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\}$$

Za tri različite vrijednosti granične učestanosti $f_N = \omega_N/2\pi$ ($f_N \ll 1/\tau$, $f_N = 1/\tau$ i $f_N \gg 1/\tau$), talasni oblici izlaznog signala prikazani su na slici.



Slika: Uticaj ograničenog propusnog opsega sistema propusnika niskih učestanosti na prenošeni pravougaoni impuls $x(t)$ i njegov odziv $y(t)$ za razne granične učestanosti

Na osnovu rezultata prikazanih na slici, mogu se izvesti neki zaključci:

- U sva tri slučaja odziv ***kasni u vremenu*** za veličinu t_0 određenu faznim kašnjenjem koje unosi sistem za prenos.
- U slučaju kada je širina propusnog opsega znatno manja od recipročne vrijednosti trajanja impulsa ($f_N \ll 1/\tau$), dobijeni odziv veoma malo liči na poslati impuls (***izobličenje je vrlo veliko***).
- U slučaju kada je širina propusnog opsega jednaka recipročnoj vrijednosti trajanja impulsa ($f_N = 1/\tau$), dobijeni odziv omogućava da se prepozna da je bio poslat impuls i , relativno uzevši, liči na njega. Njegov talasni oblik je daleko od toga da bude pravougaonik.
- U slučaju kada je širina propusnog opsega znatno veća od recipročne vrijednosti trajanja impulsa ($f_N \gg 1/\tau$), dobijeni odziv znatno više liči na poslati pravougaoni impuls.
- Trenutak u kome se završava ulazni signal je $t = \tau/2$, dok je izlazni signal traje beskonačno $t \rightarrow -\infty$. Ovakav rezultat ukazuje na neku nepravilnost. ***Ne može da postoji odziv na izlazu, a dane postoji pobudni signal na ulazu u sistem.***

✓ Zaključak:

Idealan sistem propusnik niskih učestanosti sa proizvoljno odabranom amplitudskom i faznom karakteristikom ***ne može se realizovati***.

Prenos signala

Različite vrste poruka se, prije prenosa telekomunikacionim sistemima, transformišu u električne signale.

U zavisnosti od medjusobnog odnosa karakteristika prenosnog puta, s jedne strane, i predajnika i prijemnika, sa druge strane, prenos poruka, odnosno signala, može biti ostvaren u različitim formama. Postoje dva osnovna tipa prenosa poruka prenosnim medijumom komunikacionog sistema:

- analogni prenos i
- digitalni prenos.

Tako se razlikuju:

- analogni signali, kod kojih je analitički izraz kojim se opisuju promjene nekog od parametara signala u vremenu takav da predstavlja kontinualnu vremensku funkciju;
- digitalni signali, kod kojih je vremenska funkcija koja definiše promjene nekog od parametara signala predstavljena kombinacijom diskretnih elemenata koji su uzeti iz nekog konačnog skupa. Najjednostavnija forma digitalnih signala su binarni koji mogu imati jednu od dvije vrijednosti uobičajeno označene binarnim simbolima 0 i 1. U opštem slučaju, može se govoriti o M-arnim digitalnim signalima, čime se naglašava činjenica da su u pitanju signali koji u svakom pojedinačnom vremenskom trenutku mogu imati jednu od M različitih vrijednosti.

Električni signali se telekomunikacionim kanalom mogu prenositi u svom izvornom obliku – ***prenos u osnovnom (prirodnom, fizičkom) opsegu učestanosti***. Ovakav prenos je najjednostavniji.

Osim ovog, postoje i drugi načini prenosa koji zahtijevaju prethodnu obradu originalnog signala na strani predajnika (koder kanala). Cilj obrade je da se oblik signala na najbolji način prilagodi karakteristikama transmisionog medijuma (linije veze). Najčešće se takva obrada realizuje postupcima **modulacije i/ili kodiranja**.

Pri tome, nezavisno od toga da li se prenos obavlja u osnovnom opsegu ili ne, uobičajeno se polazilo od toga da se kontinualne poruke prenose analognim sistemima prenosa, dok su digitalni sistemi prenosa bili rezervisani za diskretne.

Međutim, s obzirom da svaki predajnik obavlja i funkciju prilagođavanja signala (dobijenog kroz postupak neposrednog pretvaranja poruke u njen električni (ili svjetlosni) ekvivalent) karakteristikama prenosnog puta, a u cilju ostvarivanja maksimalnog kvaliteta u prenosu, postoje i mogućnosti da se diskretne poruke prenose analognim sistemima prenosa, kao što se i kontinualne poruke mogu prenositi digitalnim signalima.

Vrsta poruke	Originalni signal	Vrsta prenosa	Postupak obrade
Kontinualna	Analogni	Analogni	Bez obrade (u osnovnom opsegu)
			Obrada signala (Modulacija)
		Digitalni	Kodiranje (analogno/digitalna konverzija)
Diskretna	Digitalni	Analogni	Modulacija
		Digitalni	Prenos u osnovnom opsegu (eventualno kodiranje)
			Obrada signala (modulacija)

Kada su u pitanju kontinualne poruke, na raspolaganju su sledeće mogućnosti:

- Prva se odnosi na njihov prenos analognim signalima, pri čemu je to moguće ostvariti bez primjene obrade signala (u osnovnom opsegu učestanosti) ili sa primjenom obrade signala. Prenos kontinualne poruke analognim signalom koji ne prolazi kroz fazu obrade u predajniku predstavlja tzv. prenos u osnovnom opsegu učestanosti. Jasno je da je struktura takvog predajnika vrlo jednostavna i uključuje samo pretvaranje poruke u signal.
- Prenos kontinualne poruke analognim signalom se može ostvariti i nakon njegove prethodne obrade kroz postupak modulacije kojim se može postići njegovo optimalno prilagodjenje karakteristikama prenosnog puta.
- Konačno, kada su u pitanju kontinualne poruke, moguć je i njihov prenos digitalnim signalom (digitalizacija). U tom slučaju, primjenom obrade generički nastalog analognog signala na način što se primijeni određeni postupak kodiranja, dobija se mogućnost korišćenja svih prednosti koje digitalni prenos ima u odnosu na analogni. S obzirom da se zadatak kodiranja u tom slučaju svodi na pretvaranje analognog signala u digitalni, uobičajeno se takvo kodiranje naziva analogno/digitalnom konverzijom.

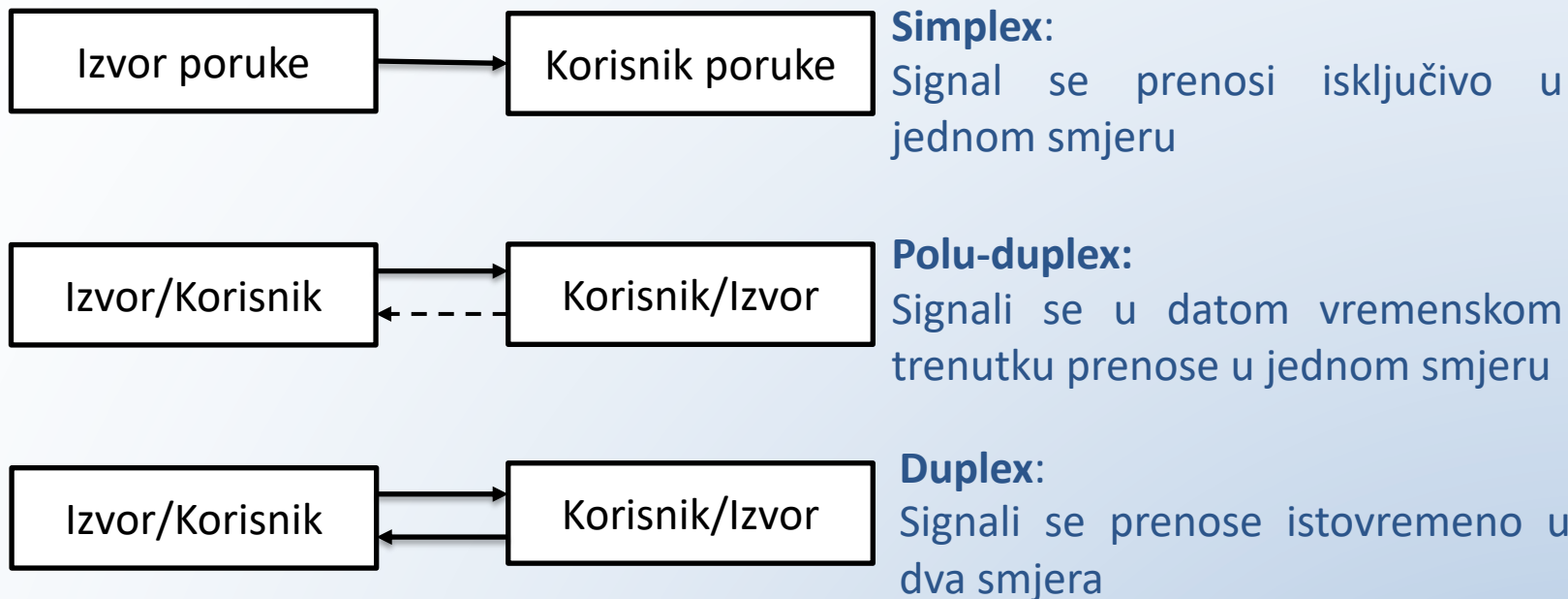
Simplex/Polu-duplex/Duplex prenos

Pored ove osnovne klasifikacije, u okviru navedenih postupaka prenosa, moguće je identifikovati i druge specifičnosti na osnovu kojih se može napraviti njihova dalja sistematizacija.

Tako se prenos poruka pojavljuje kao jednosmjerni ili dvosmjerni. Shodno tome, prenos poruka (kontinualnih i diskretnih) može biti realizovan u jednom od sledeća tri oblika:

- simplex (prenos u jednom smjeru),
- polu-duplex (naizmjeničan prenos u dva smjera),
- duplex (simultani prenos u dva smjera).

Očigledno je da duplex prenos, za razliku od simplex i polu-duplex prenosa, generalno zahtijeva 2- kanalnu vezu. Većina savremenih telekomunikacionih mreža je zasnovana na duplex prenosu, pri čemu se najčešće ostvaruje prenos poruke u jednom smjeru, dok se simultano u drugom smjeru prenosi neka vrsta kontrolne ili upravljačke informacije.



Simplex prenos znači prenos u samo jednom smjeru, tako da samo prima poruke, a ne emituje ih. U ovom obliku prenosa prijemni uređaj nema mogućnost odgovora ili potvrde o prijemu signala.

Polu-duplex prenos omogućava prenos poruka u oba smjera, ali ne istovremeno. U ovom prenosnom modu, uređaji na oba kraja veze se prebacuju iz stanja prijema u stanje predaje nakon svakog prenosa, što se obično obavlja pod kontrolom posebnog kontrolnog signala koji generiše izvor poruke.

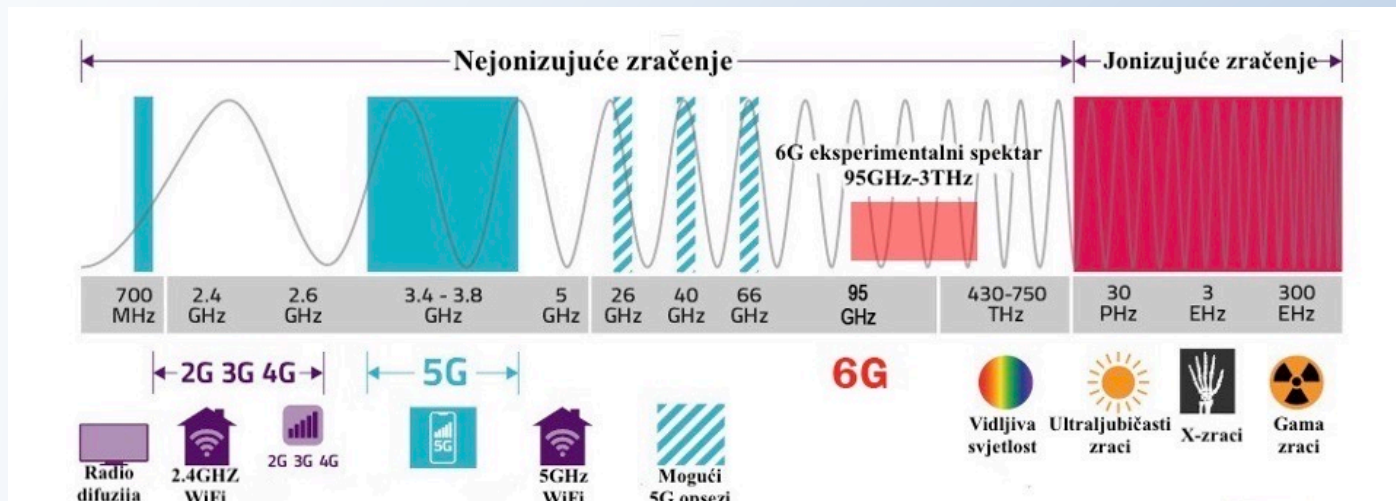
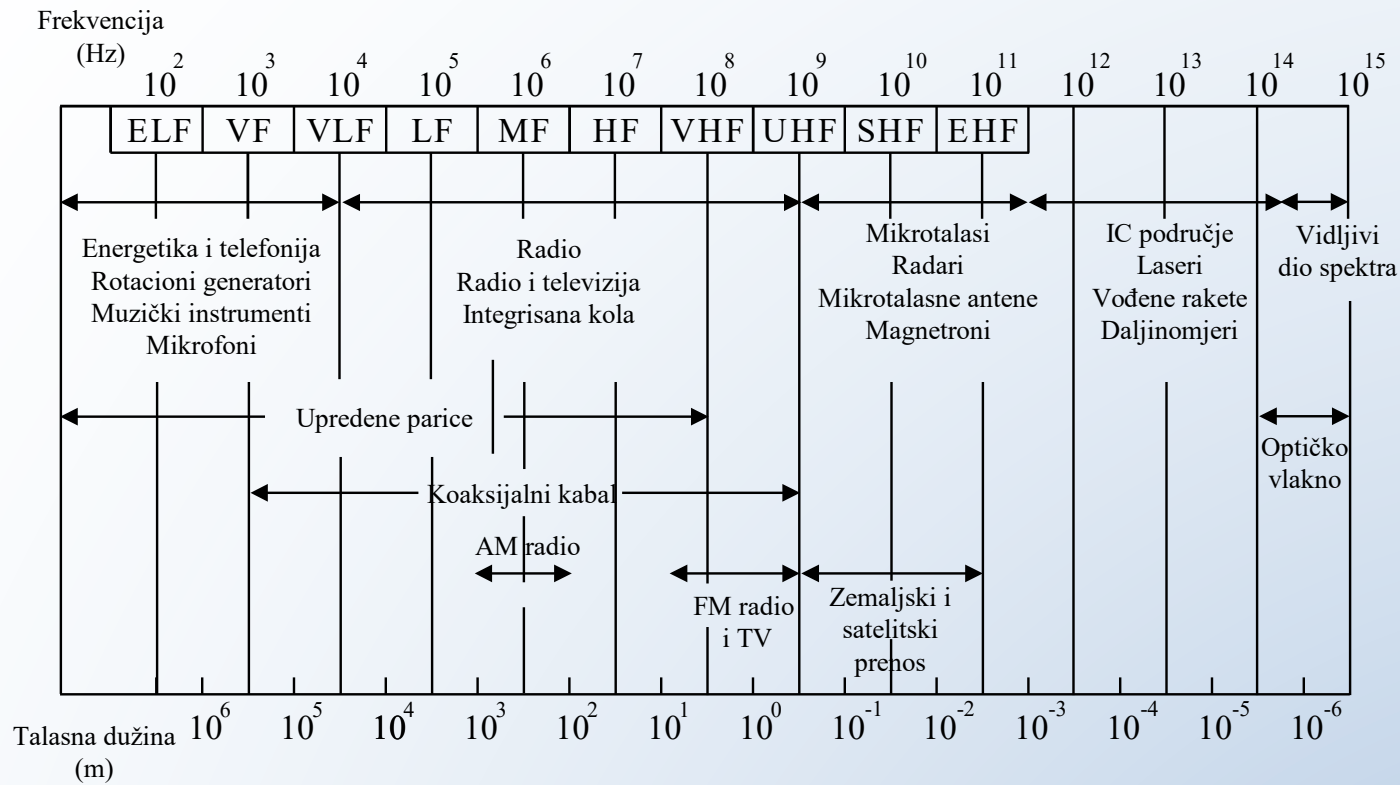
Prenosni putevi

Prenosni putevi (linija veze, transmisioni medij) se generalno mogu podijeliti na:

- vođene (guided), odnosno fiksni i
- nevođene (non-guided), odnosno bežični.

Elektromagnetni talasi su vođeni kroz medij od čvrstog materijala, kao što je bakarna parica, koaksijalni kabal ili optičko vlakno .

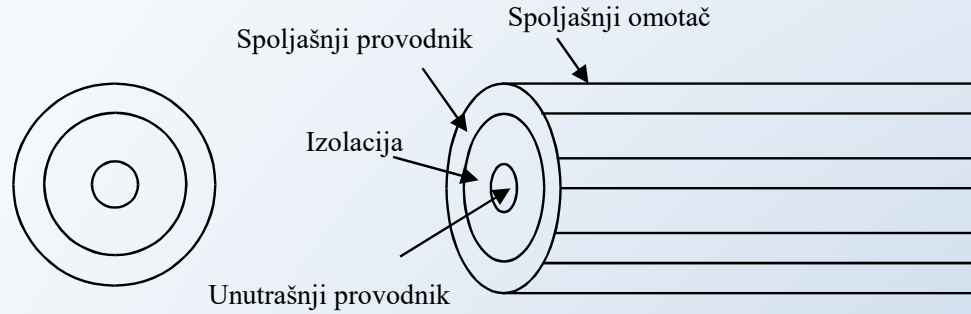
Atmosfera i slobodni prostor su primjeri medija kojima se ostvaruje nevođena komunikacija, putem slobodnog prostiranja elektromagnetnog talasa.



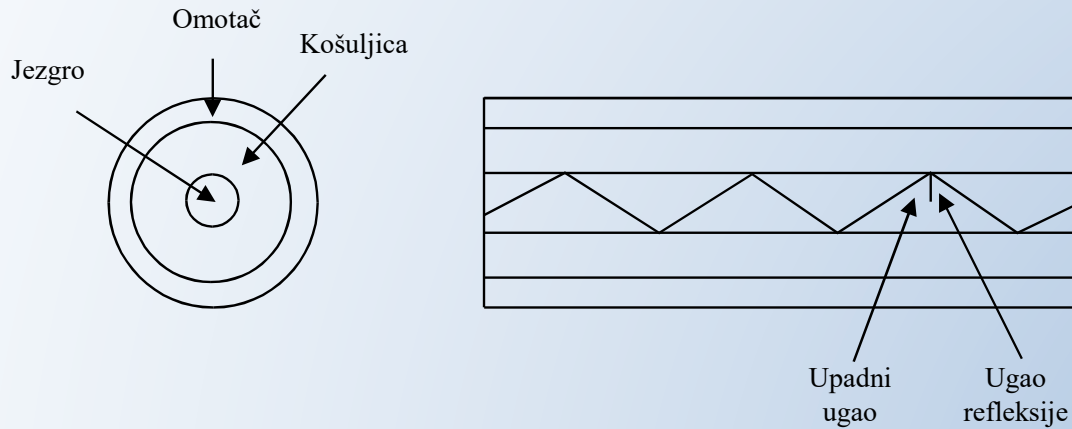
Raspodjela telekomunikacionih frekvencija unutar elektromagnetnog spektra



a)



b)



c)

Vođeni prenosni putevi

a) Upredena parica; b) Koaksijalni kabl; c) Optičko vlakno



Bakarni kablovi

Bakarni kablovi predstavljaju najstariji i najčešće korišćeni prenosni medij. Njegovi glavni nedostaci su veliko slabljenje i osetljivost na električne smetnje. Slabljenje u bakarnom kablju raste sa frekvencijom približno prema sledećoj formuli:

$$A_{dB} = k\sqrt{f} \text{ dB}$$

gdje je A_{dB} slabljenje u decibelima, f je frekvencija, a k je konstanta specifična za svaki kabl. Brzina prostiranja signala u bakarnom kablju je približno 200.000 km/sec. Tri glavna tipa bakarnih kabljeva su: upredena parica, UTP, koaksijalni kabl.

Upredena parica - Sastoji od dvije izolovane bakarne žice koje su obično debljine 0,4 do 0,6 mm ili oko 1 mm debljine ako je uključena izolacija. Ove dvije žice su upletene zajedno da bi se smanjile spoljašnje električne smetnje i smetnje od jednog para do drugog u istom kablju. Upredeni par je simetričan i razlika u naponu između ove dvije žice sadrži signal koji se prenosi. Upredena parica se lako instalira, zahtijeva malo prostora i ne košta mnogo. Ranije su se koristile u telekomunikacionim mrežama u pretplatničkim linijama (last mile), za digitalni prenos od 2 Mb/s sa rastojanjem do 2 km između repetitora, u DSL (Digital Subscriber Line) vezama do nekoliko megabita u sekundi, i u prenosu podataka na mala rastojanja sa brzinama do 100 Mb/s u LAN-ovima.

UTP (Unshielded twisted pair) kabl je mrežni kabl koji se koristi za prenos različitih signala (danas:podataka). Na početku je to bio jednožičani kabl (upredena parica) koji se koristio u mrežama za prenos telefonskog signala. Nakon toga se koristio za najrazličitije namjene, pa i danas predstavlja značajan dio infrastrukture u svijetu.

Razvijali su se na sledeće način:

- Kategorija 3. UTP kablovi, i odgovarajući konektori, koji podržavaju brzinu prenosa od 16Mb/s za rastojanja do 100m.
- Kategorija 5. UTP kablovi i konektori, koji podržavaju brzinu prenosa od 100Mb/s za rastojanja do 100m.
- Kategorija 5e. UTP kablovi i konektori, koji podržavaju brzinu prenosa do 1Gb/s za rastojanja do 100m, sa mogućnošću podrške brzina do 10Gb/s na manjim rastojanjima.
- Kategorija 6. UTP kablovi i konektori, koji podržavaju brzinu prenosa do 10Gb/s za rastojanja do 100m.
- Kategorija 6e. U svemu slični sa kategorijom 6, sa poboljšanjima u vidu nestajanja šuma prilikom rada, kao i u pogledu značajne stabilizacije signala.

Koaksijalni kabl - U koaksijalnom kablju, kruta bakarna žica čini jezgro, koje je okruženo izolacionim materijalom. Izolator je obložen cilindričnim provodnikom, a spoljni provodnik je prekriven zaštitnim plastičnim omotačem. Implementacija koaksijalnog kabla daje dobru kombinaciju velikog propusnog opsega i odlične otpornosti na šum i smetnje. Koaksijalni kablovi su korišćeni u LAN mrežama (originalni 10 Mb/s Ethernet), u antenskim sistemima za emitovanje radija i TV-a, kao i u analognim i digitalnim telekomunikacionim sistemima velikog kapaciteta, pa čak i u podmorskim sistemima starije generacije.

Optičko vlakno

Optičko vlakno je najsavremeniji fiksni medij za prenos. Omogućava širok propusni opseg, malo slabljenje i izuzetno visoku otpornost na spoljašnje električne smetnje. Optičke veze se koriste globalno kao glavni mediji za prenos na velike udaljenosti, tako da se koaksijalni kablovi visokog kapaciteta postepeno zamjenjuju upravo optičkim vlaknima.

Optičko vlakno ima centralno jezgro (prečnika oko 8 ili 60 μm) od veoma čistog stakla okruženo spoljnim slojem manje gustog stakla. Princip prenosa zasnovan je na činjenici da je indeks prelamanja jezgra uvijek veći od indeksa prelamanja omotača, tako da se svjetlosni zrak lomi od površine između ovih materijala nazad do jezgra i širi se u jezgru od kraja do kraja. Indeks prelamanja (n) neke sredine je odnos brzine prostiranja svjetlosti u slobodnom prostoru ($c=3 \cdot 10^8$ m/s) i u toj sredini (v):

$$n=c/v$$

Optička vlakna se danas koriste za sve vrste mreža, uključujući i last mile pristupne mreže (FTTH-Fiber To The Home), kao i za povezivanje na velika rastojanja sa velikim kapacitetom i brzinom prenosa.

Optička vlakna imaju brojne prednosti u odnosu na druge fiksne prenosne puteve:

- Veća brzina prenosa. Svjetlost se optičkim vlaknom prostire brzinom oko 300 miliona metara u sekundi.
- Povećan kapacitet prenosa. Protoci preko 40Gb/s se mogu realizovati optičkim vlaknima, dok za upredene parice gornja granica iznosi 10Gb/s, ali na veoma kratkim rastojanjima.
- Elektromagnetna izolacija. Optička vlakna ne stvaraju elektromagnetnu interferenciju i nisu osjetljiva na spoljašnju interferenciju i atmosferska pražnjenja (ukoliko su vlakna organizovana u okviru kabla koji nije armiran).
- Nema problema preslušavanja i refleksije, prisutnih kod upredenih parica i koaksijalnih kablova.
- Manje slabljenje. Slabljenje raste sa rastojanjem sporije nego u slučaju prenosa električnim medijumima, čime se omogućava postavljanje ripitera na većim razmacima.
- Optička vlakna su pogodna za upotrebu u širokom temperaturnom opsegu, otpornija su na koroziju i vlagu.
- Troškovi održavanja su manji nego za električne kablove. Takođe je i srednje vrijeme između otkaza znatno duže.

Jedan nedostatak optičkih vlakana je što ih je teže instalirati od bakarnih kablova. Instalacija i održavanje, na primer, popravka polomljenog vlakna, zahtjevaju posebnu opremu i dobro obučeno osoblje.

U odnosu na način prostiranja svjetlosti duž vlakna, razlikuju se:

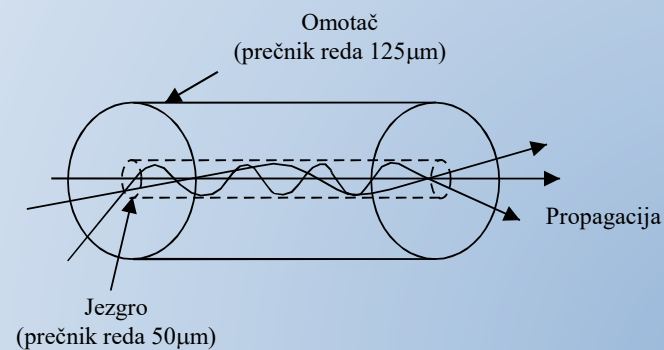
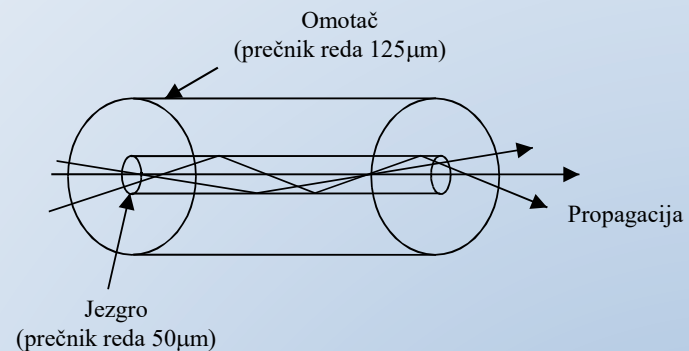
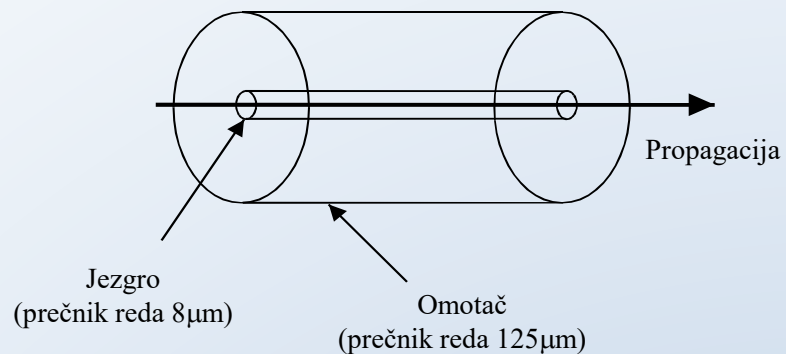
- monomodna i
- multimodna vlakna.

Kod monomodnih vlakana postoji samo jedna putanja prostiranja svjetlosti duž jezgra.

Za smanjivanje broja refleksija od ivice jezgra, potrebno je da jezgro bude što je moguće manje (reda 8mm), što stvara probleme u proizvodnji.

Multimodna vlakna, imaju veći prečnik jezgra i veći broj putanja prostiranja dobijenih refrakcijom svjetlosnog zraka. Postojanje više putanja prostiranja različitih dužina, a time i različitih vremena potrebnih za prelazak vlakna, dovodi do toga da se pojedinačni elementi signala (impulsi) rasipaju u vremenu. Ova pojava zove se **modalna disperzija**. Multimodna vlakna se mogu realizovati kao:

- dvoslojna i
- gradijentna



Bežični prenosni putevi

Najvažnija prednost bežičnog prenosa u odnosu na fiksni prenos je u tome što se ne zahtijeva postojanje fizičke linije veze. Bežični sistemi se brzo ugrađuju i troškovi su mnogo manji. Međutim, važan faktor koji ograničava upotrebu bežičnog prenosa je činjenica da frekvencijske predstavljaju ograničeni resurs.

Kod bežičnih veza, predaja i prijem signala se ostvaruju pomoću antena, koje predstavljaju konvertore električnih signala u elektromagnetno zračenje (predajna antena) i obrnuto (prijemna antena).

Dva tipa konfiguracije za bežični prenos:

- direkcioni i
- omnidirekcioni.

Bežični prenosni putevi:

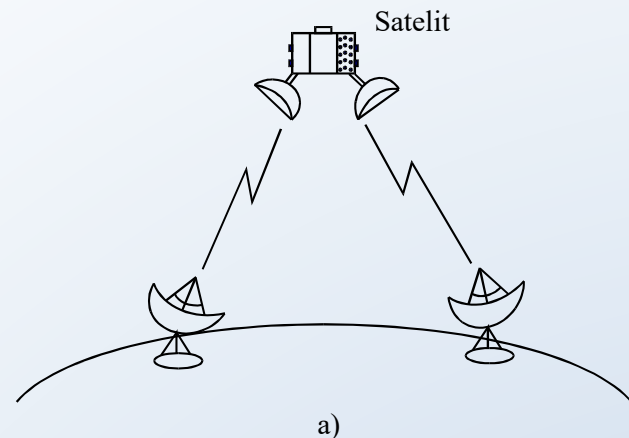
- **Zemaljske radio veze:** u VHF opsegu (30MHz -300MHz), UHF opsegu (300MHz-3GHz), sa budućim mobilnim celularnim sistemima u SHF i EHF opsezima.
- **Mikrotalasne veze:** 2-40 GHz. Ključni elementi, potrebni za uspostavljanje mikrotalasnih veza, su parabolične antene prečnika od 0,4 do 2,6m. Uspostavljanje veze podrazumijeva postojanje linije direktne vidljivosti između predajne i prijemne antene. U tim uslovima maksimalno rastojanje između antena je moguće odrediti relacijom:

$$d = 7.14\sqrt{Kh}$$

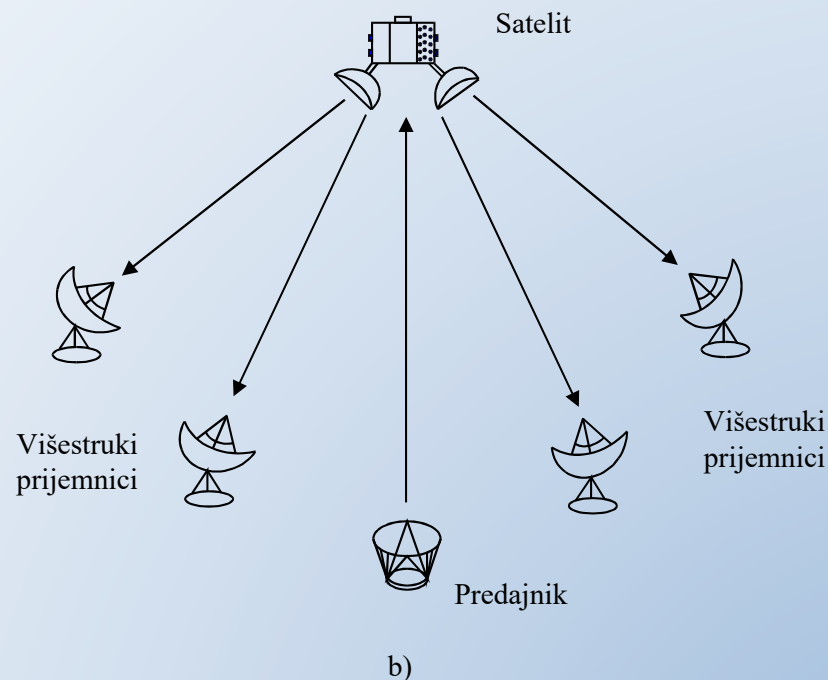
gdje je d rastojanje između antena u kilometrima, h je visina antene, i K je faktor prilagođenja u slučaju da talas prati zakrivljenost Zemljine površine (obično se uzima $K=4/3$).

- **Radio difuzija:** Za ovu vrstu prenosnih puteva koristi se opseg od 30 MHz do 1GHz. S obzirom da je riječ o tehnici zasnovanoj na radio prenosu po liniji direktne vidljivosti, važi uslov kao i kod mikrotalasa o maksimalnom mogućem rastojanju.
- **Satelitske mikrotalasne veze:** Komunikacioni satelit je mikrotalasna relejna stanica (transponder - prijemnik sa automatskom predajom odgovora), koja funkcioniše na učestanostima od 1 do 30GHz.

Zemaljska stanica emituje signal prema satelitu u jednom frekvencijskom opsegu, a satelit ga regeneriše i emituje signal nazad u drugom frekvencijskom opsegu.



Da bi komunikacioni satelit efikasno funkcionisao, generalno je potrebno da ostane stacionaran u odnosu na poziciju prema Zemlji. U protivnom dolazilo bi do gubljenja linije direktne vidljivosti od zemaljskih stanica. Da bi se postigla ta stacionarnost, satelit mora imati period rotacije jednak periodu Zemljine rotacije.



*Konfiguracije za satelitske komunikacije:
Komunikacija između dva korisnika preko satelita
(point to point); b) Prosljeđivanje signala od
predajnika prema većem broju prijemnika*

Prenos analognih signala

Prenos analognih signala:

- U osnovnom opsegu učestanosti
- Nakon izvršene obrade u predajniku

Obrada analognih signala ostvaruje se u predajniku na način što se jednom pomoćnom periodičnom determinističkom signalu modifikuju neki osnovni parametri, tako da on postane ***nosilac*** originalnog signala, a samim tim i prenošene poruke. Postupak kojim se modifikuju parametri periodičnog signala u funkciji karakterističnih veličina izvornog signala, naziva se ***modulacija***.

Cilj u postupku modulacije je da se signal obradi tako da bude podesan za prenos, odnosno da se njegove karakteristike prilagode karakteristikama transmisionog puta.

Signal koji je originalni nosilac poruke naziva se ***modulišući signal***, pomoćni periodični signal se naziva ***nosilac***, a modulisućim signalom modifikovani nosilac naziva se ***modulisani signal***.

Na mjestu prijema primljeni modulisani signal mora da se podvrgne novoj obradi. Neminovan je inverzan proces: iz modulisanoog signala treba “izvući” originalan signal koji nosi poruku. Takav postupak obrade modulisanoog signala u prijemniku naziva se ***demodulacija***, a na prijemu dobijeni originalan signal ***demodulisani (detektovani) signal***.

Modulacija i demodulacija predstavljaju dva nerazdvojiva postupka u prenosu signala. Prvi je vezan za predajnik, a drugi za prijemnik. Sklop kojim se obavlja modulacija naziva se ***modulator***, a sklop u kome se obavlja demodulacija ***demodulator***. U opštem modelu komunikacionog sistema, modulator je sastavni dio kanalnog kodera, a demodulator kanalnog dekodera. Zajedničkim imenom, obično se modulator i demodulator nazivaju: ***modem***.

Obrada signala ima veliki značaj. Neke mogućnosti koje pruža modulacija su:

- Radioprenos poruka
- Frekvencijski multipleksni ili višekanalni sistemi prenosa.
- Veća zaštita prenošenog signala od uticaja smetnji u vidu šumova.
- Specijalnim postupcima modulacije signali se mogu zabilježiti i uskladištiti, što ima poseban značaj za njihovu reprodukciju u bilo kom vremenskom trenutku.

Postoje različiti načini za modulisanje nosilaca koji se mogu klasifikovati u nekoliko grupa. Podjela se može izvršiti prema talasnom obliku modulisanog signala:

- 1) postupci u kojima je modulisani signal kontinualan,
- 2) one u kojima se kao rezultat modulacije dobija signal impulsnog talasnog oblika (naredni semestar).

Kod postupaka u kojima se dobija ***kontinualan*** modulirani signal kao nosilac se koristi signal ***sinusoidalnog talasnog oblika***. On ima tri karakteristična parametra: amplitudu, učestanost i fazu. Na svaki od ovih parametara se može posebno uticati, tako što se izabrani parametar mijenja direktno srazmjerno modulišućem signalu. U skladu sa tim razlikuje se:

- a) ***Amplitudska modulacija*** (AM) - amplituda nosioca postaje direktno proporcionalna modulišućem signalu;
- b) ***Frekvencijska modulacija*** (FM) - učestanost nosioca postaje direktno proporcionalna modulišućem signalu;
- c) ***Fazna modulacija*** (Φ M) - faza nosioca postaje direktno proporcionalna modulišućem signalu.

Poslednja dva modulaciona postupka se nazivaju zajedničkim imenom ***ugaona modulacija*** (UM).

AMPLITUDSKA MODULACIJA

Spada u grupu linearnih modulacionih postupaka u kojima se koristi kontinualni nosilac sinusoidalnog talasnog oblika.

Kod linearnih modulacionih postupaka modulacija se svodi na translaciju spektra modulišućeg signala u domen viših učestanosti, pri čemu ne dolazi do generisanja novih spektralnih komponenti.

U procesu ove modulacije amplituda nosioca modifikuje se tako da ona postane vremenska funkcija direktno srazmjerna modulišićem signalu.

Postoji nekoliko vrsta amplitudski moduliranih signala. Oni se međusobno razlikuju po tome koji se karakteristični dio spektra moduliranog signala prenosi, pa razlikujemo:

1. AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO)
2. AM signal sa dva bočna opsega i nosiocem – konvencionalni AM signal (KAM)
3. AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO)
4. AM signal sa nesimetričnim bočnim opsezima (AM-NBO)

Inverzan proces - demodulacija AM signala je takođe linearan i predstavlja translaciju spektra iz domena viših u domen nižih učestanosti.

PRODUKTNA MODULACIJA-PRINCIP DOBIJANJA AM SIGNALA

Nosilac je kontinualan, oblika:

$$u_0(t) = U_0 \cos \omega_0 t$$

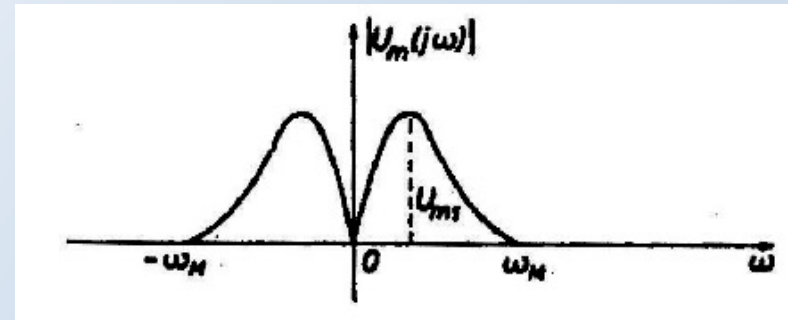
$U_0 = \text{const.}$ je amplituda napona nosioca, $\omega_0 = 2\pi f_0$ njegova kružna učestanost.

Neka je sa $u_m(t)$ označen električni ekvivalent poruke (modulišući signal).

Pretpostavimo da modulišući signal ima sledeće osobine:

- da je njegova srednja vrijednost jednaka nuli;
- da je njegov spektar ograničen učestanošću ω_M

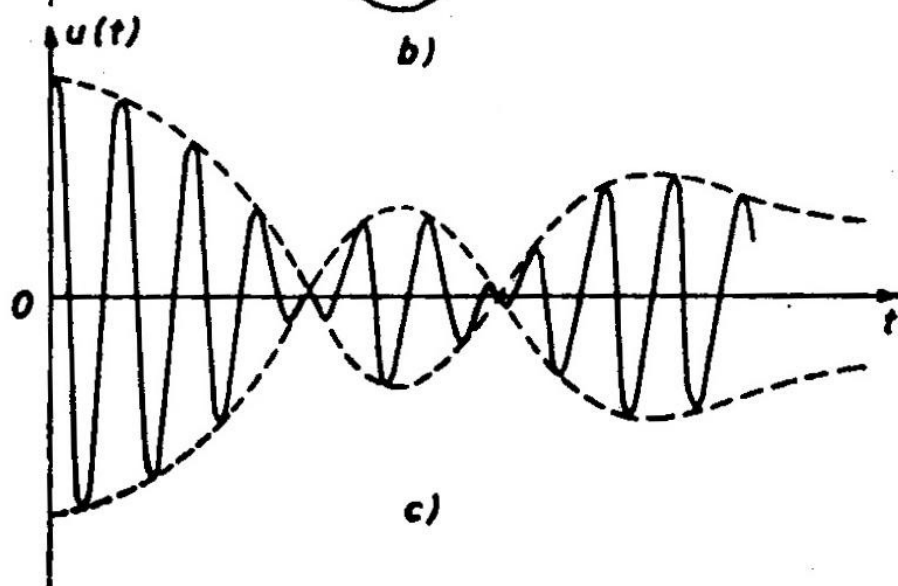
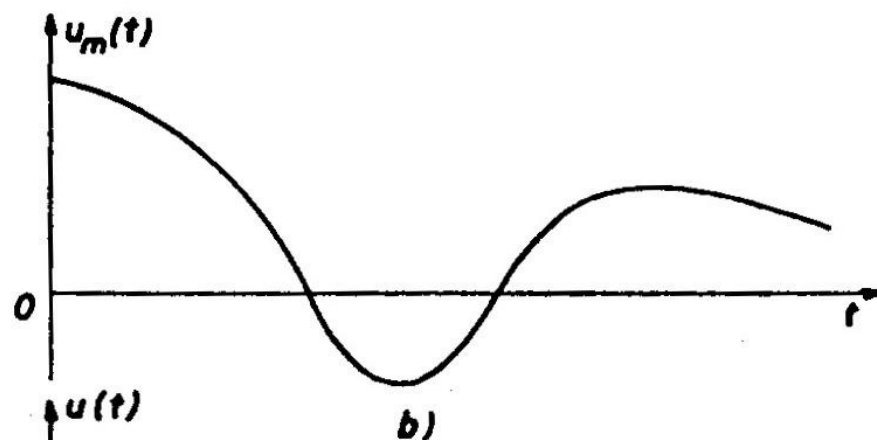
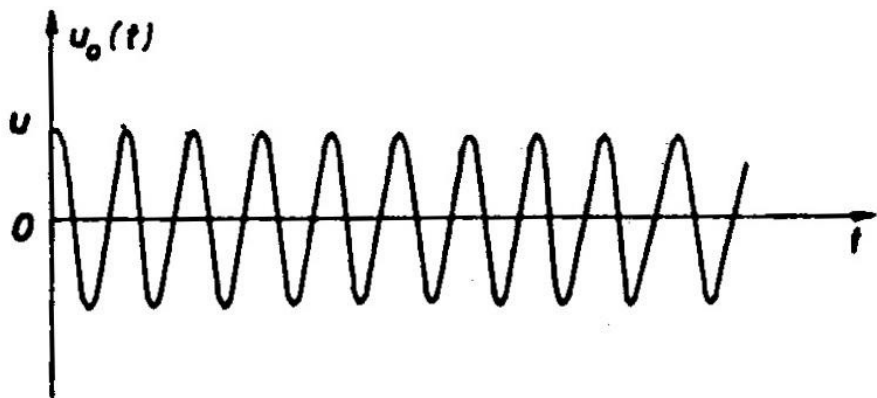
$$U_m(j\omega) = \begin{cases} U_m(j\omega) & |\omega| < \omega_M \\ 0 & |\omega| > \omega_M \end{cases}$$



Amplitudska modulacija podrazumijeva modifikaciju amplitude nosioca tako da ona u procesu modulacije postaje direktno srazmjerna modulišućem signalu. Stoga izraz za amplitudski modulirani signal treba da bude u obliku:

$$u_{AM}(t) = k_U u_m(t) \cos \omega_0 t$$

k_U predstavlja neku konstantu proporcionalnosti. Veličina $k_U u_m(t)$ može da se shvati kao promjenljiva amplituda koja nosi poruku.



Na slici su prikazane funkcije koje predstavljaju nosilac, modulišući i modulisani signal. Uočava se da je anvelopa modulisanog signala direktno srazmjerna modulišućem signalu.

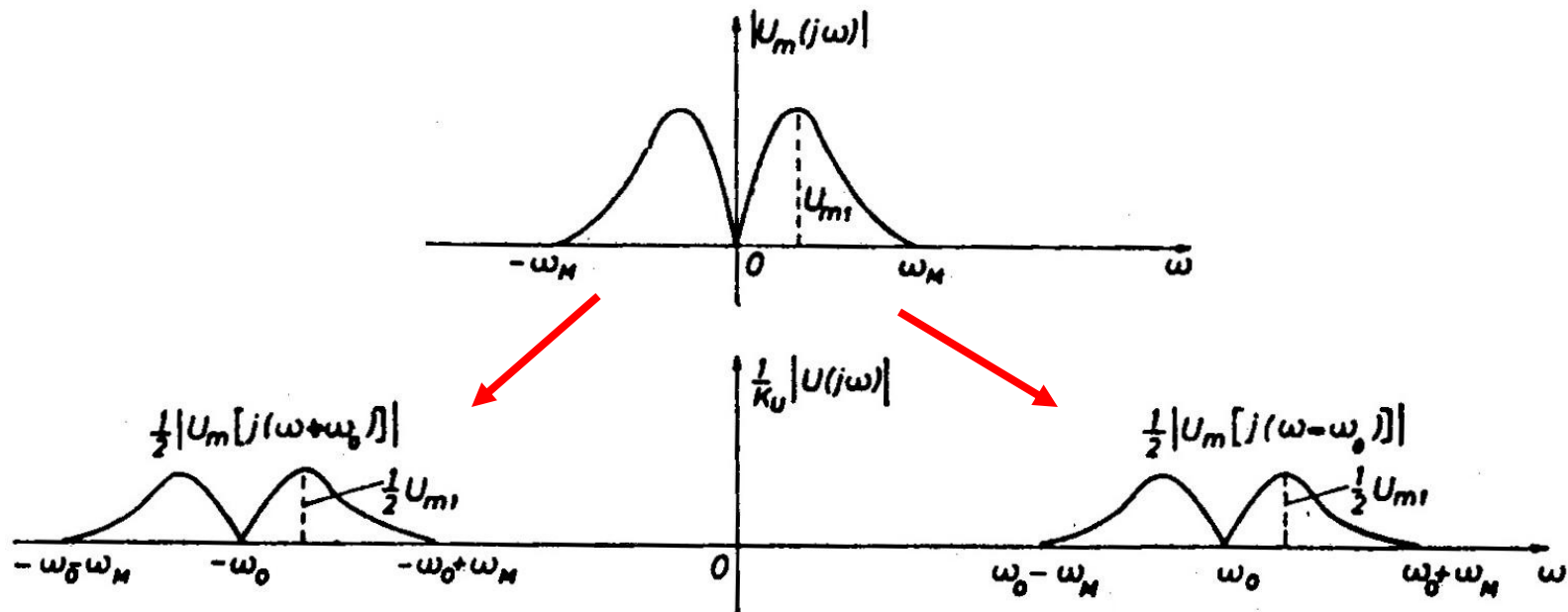
Iz izraza za AM signal vidi se da se on dobija kao proizvod dvije funkcije: $k_U u_m(t)$ i $\cos \omega_0 t$. Stoga se modulacija zasnovana na ovom principu naziva **produktna modulacija**, a sklopovi pomoću kojih se ona realizuje nazivaju se **produktivnim modulatorima**.

Slika: a) Nosilac b) modulišući signal c) modulisani signal

Spektar dobijenog AM signala (primjenom Fourier-ove transformacije):

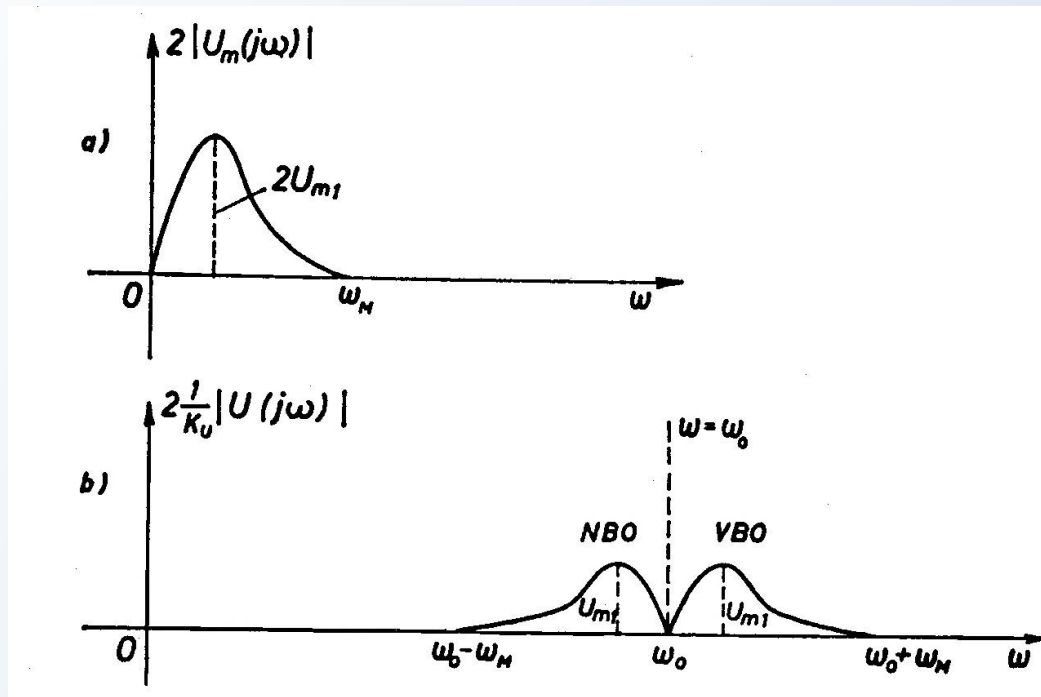
$$U(j\omega) = \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega - \omega_0)] + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega + \omega_0)]$$

Zaključujemo da se množenjem signala i nosioca u vremenskom domenu vrše dvije translacije u frekvencijskom domenu, jedna za vrijednost učestanosti nosioca ω_0 i druga za $-\omega_0$.



Slika: Na gornjoj slici je spektralna gustina amplituda modulišućeg signala $u_m(t)$, a na donjoj spektralna gustina amplituda modulisanog signala $u(t)/k_U = u_m(t)\cos \omega_0 t$

Poslije izvršene amplitudske modulacije širina spektra je dva puta veća od širine spektra modulišućeg signala. Spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti $(\omega_0 \div \omega_0 + \omega_M)$ naziva se **višim bočnim opsegom** (VBO), a njemu simetričan spektar u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0)$ **nižim bočnim opsegom** (NBO).



Slika: a) Spektralna gustina amplituda modulišućeg signala $u_m(t)$
 b) spektralna gustina amplituda modulisanog signala $u(t)/k_U = u_m(t)\cos \omega_0 t$
 u slučaju kada se uzmu u obzir samo pozitivne učestanosti.

- Oblik i jednog i drugog bočnog opsega ostao je isti kao i oblik spektra modulišućeg signala. Znači, modulirani signal vjerno nosi u sebi prenošenu poruku.
- Cilj modulacije je translacija spektra modulišućeg signala za vrijednost ω_0 .
- Prenošeni signal $u_m(t)$, u svom osnovnom opsegu učestanosti, ima spektar koji zauzima opseg:

$$B_{NF} = f_M - 0 = f_M$$

Modulirani signal zauzima dva puta širi opseg učestanosti :

$$B_{VF} = (f_0 + f_M) - (f_0 - f_M) = 2f_M = 2B_{NF}$$

Modulirani signal ima dva bočna opsega, i ovaj tip amplitudski moduliranog signala naziva se AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO). I viši i niži bočni opseg imaju oblik spektra modulišućeg signala, pa je za prenos željene poruke u principu dovoljno prenositi samo jedan bočni opseg. Takav AM signal se naziva AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO).