

Prenos signala

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

U zavisnosti od međusobnog odnosa karakteristika prenosnog puta, sa 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.

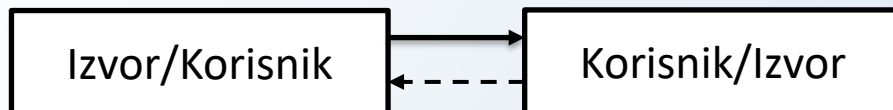
Tako se prenos poruka pojavljuje kao jednosmjerni ili dvosmjerni. Shodno tome, prenos poruka (kontinualnih i diskretnih) može biti realizovan u jednom od sledeća tri oblika:

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

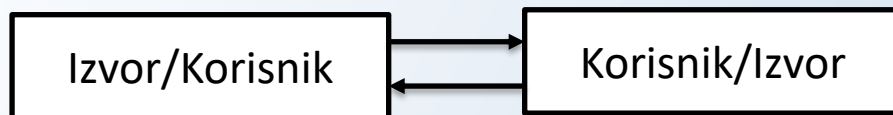
Očigledno je da duplex prenos, za razliku od simplex i polu-duplex prenosa, generalno zahtijeva 2- kanalnu vezu. Većina savremenih telekomunikacionih mreža je zasnovana na duplex prenosu, pri čemu se najčešće ostvaruje prenos poruke u jednom smjeru, dok se simultano u drugom smjeru prenosi neka vrsta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

**Simplex:**

Signal se prenosi isključivo u jednom smjeru

**Polu-duplex:**

Signali se u datom vremenskom trenutku prenose u jednom smjeru

**Duplex:**

Signali se prenose istovremeno u dva smjera

Simplex prenos znači prenos u samo jednom smjeru, tako da korisnik 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.

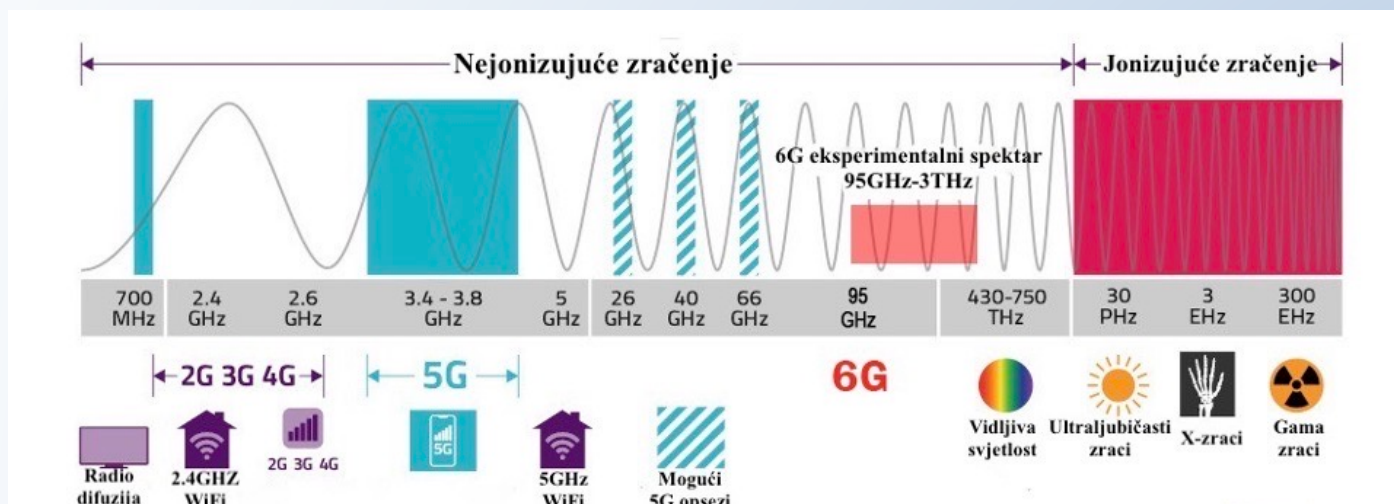
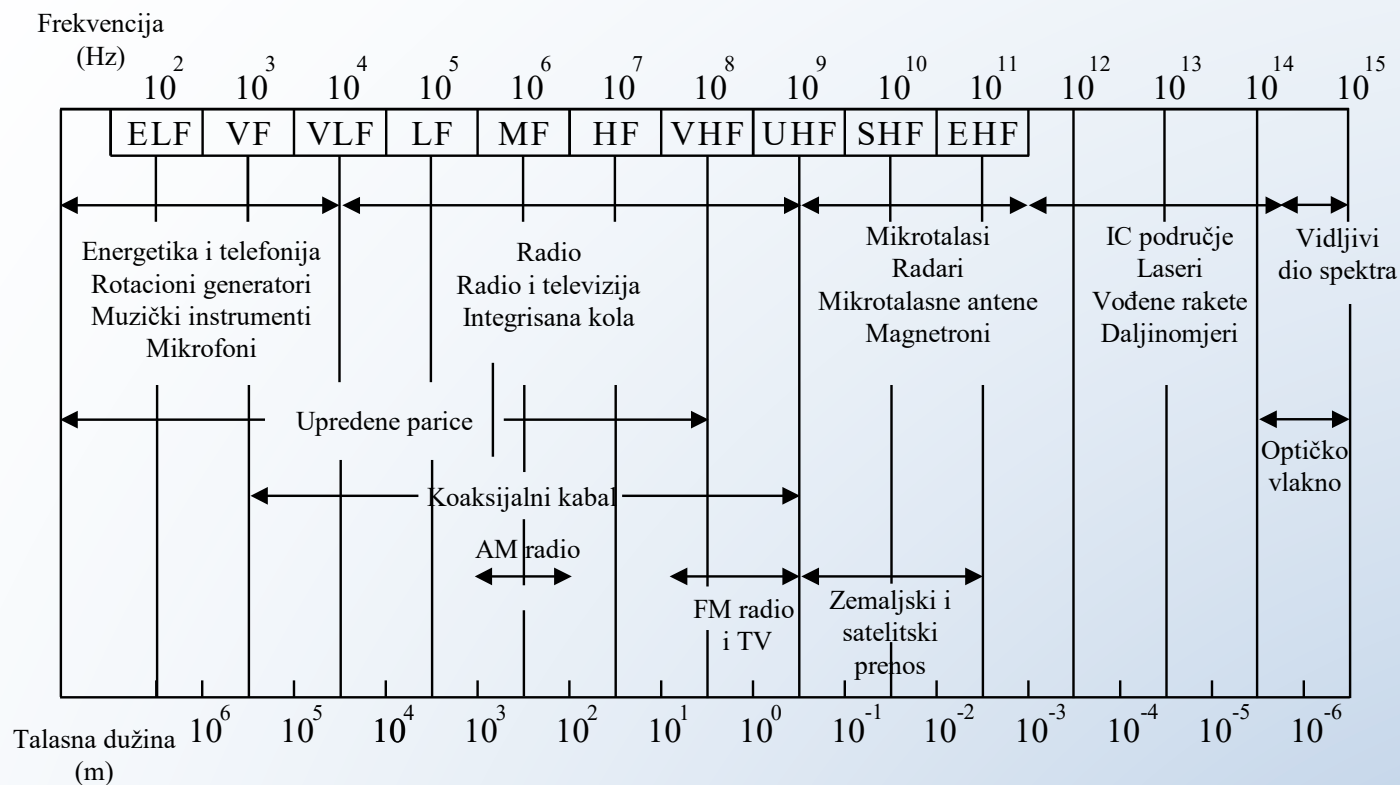
Prenosni putevi

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

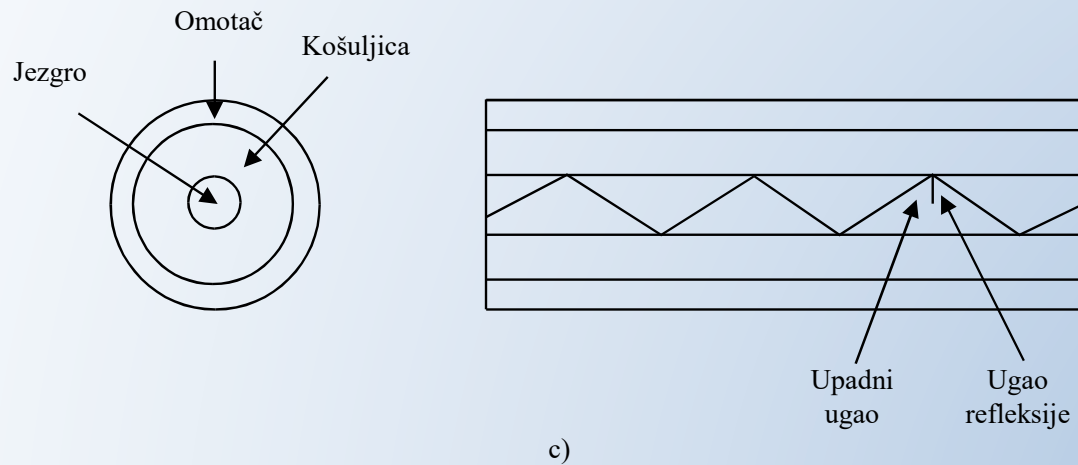
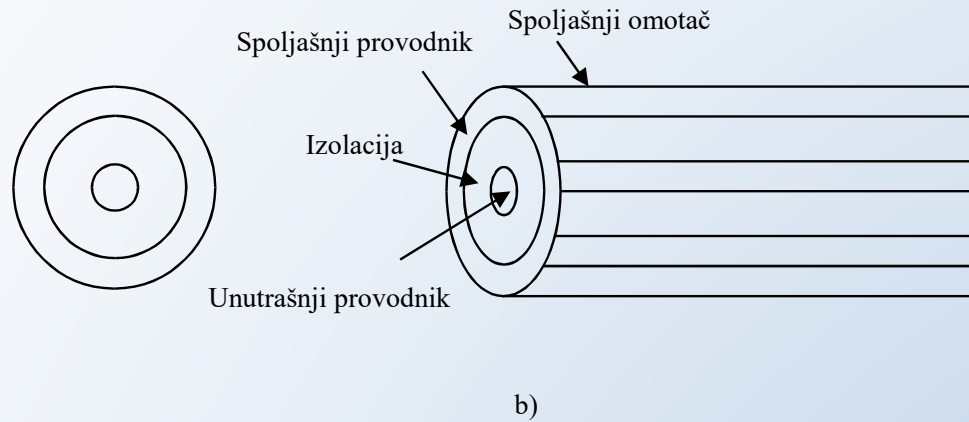
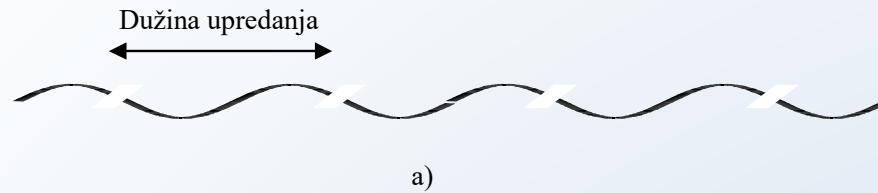
- vođene (guided), odnosno fiksne i
- nevođene (non-guided), odnosno bežične.

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



Vođeni prenosni putevi

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

Bakarni kablovi

Bakarni kablovi predstavljaju najstariji i najčešće korišćeni prenosni medijum. Njegovi glavni nedostaci su veliko slabljenje i osjetljivost 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 kabal. Brzina prostiranja signala u bakarnom kablju je približno 200.000 km/sec. Tri glavna tipa bakarnih kablova su: upredena parica, UTP, koaksijalni kabal.

Upredena parica - Sastoji se 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*) kabal je mrežni kabal koji se koristi za prenos različitih signala (danas:podataka). Na početku je to bio jednožičani kabal (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 sledeći 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 kabal - 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 medijum za prenos. Omogućava širok propusni opseg, malo slabljenje i izuzetno visoku otpornost na spoljašnje električne smetnje. Optičke veze se koriste globalno kao glavni medijumi 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 ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) 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 ostalim 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.

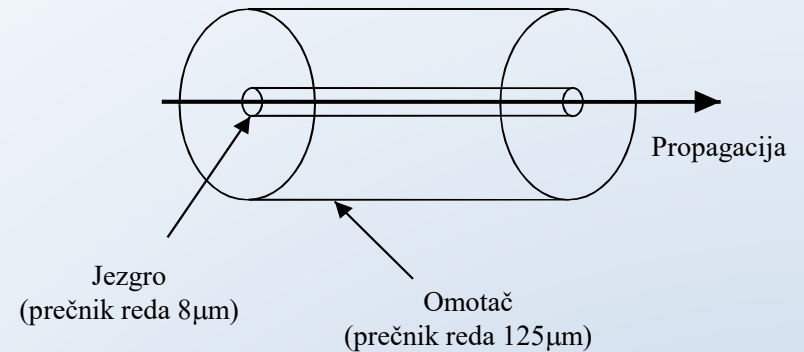
Jedan nedostatak optičkih vlakana je što ih je teže instalirati od bakarnih kablova. Instalacija i održavanje, na primjer, popravka polomljenog vlakna, zahtjevaju posebnu opremu i dobro obučeno osoblje.

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

- monomodna i
- multimodna vlakna.

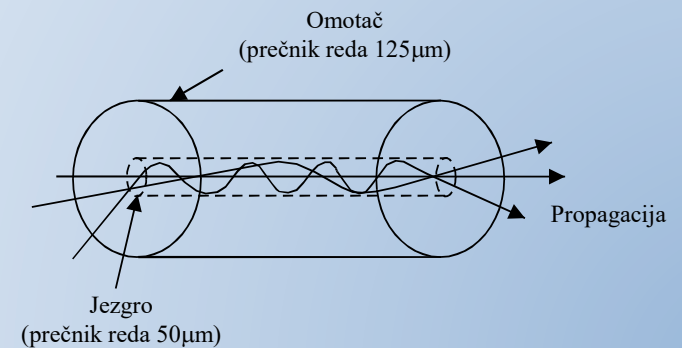
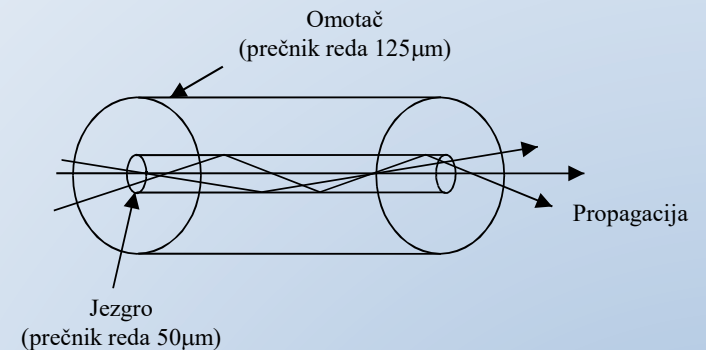
Kod monomodnih vlakana postoji samo jedna putanja prostiranja svjetlosti duž jezgra.

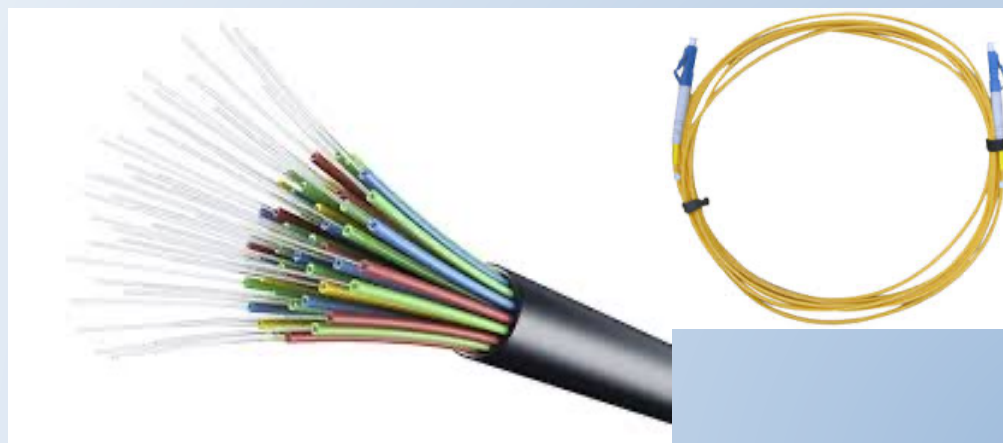
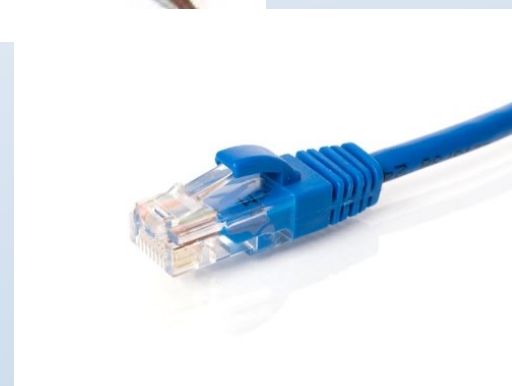
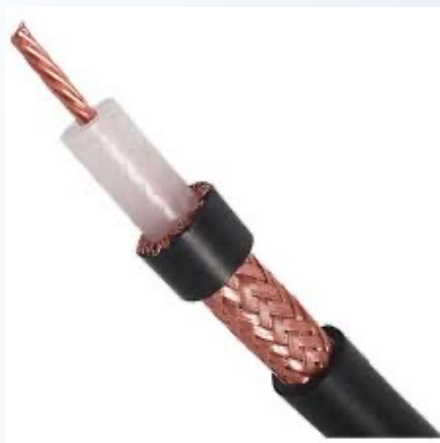
Za smanjivanje broja refleksija od ivice jezgra, potrebno je da jezgro bude što je moguće manje (reda 8mm), što stvara probleme u proizvodnji.



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 frekvencije 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:

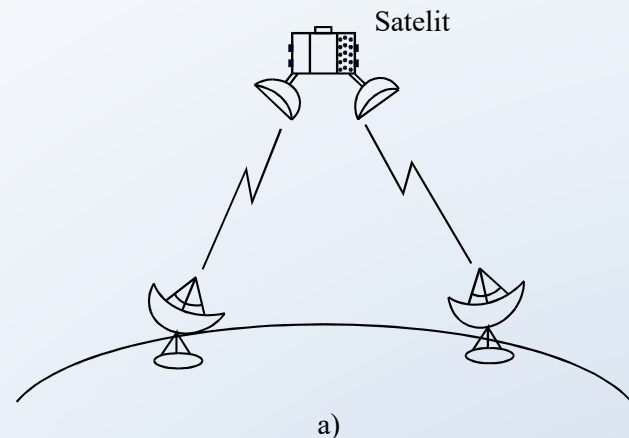
- **Zemaljske radio veze:** u VHF opsegu (30MHz -300MHz), UHF opsegu (300MHz-3GHz), sa budućim mobilnim celularnim sistemima u SHF i EHF opsezima.
- **Mikrotalasne veze:** 2-40 GHz. Ključni elementi, potrebni za uspostavljanje mikrotalasnih veza, su parabolične antene prečnika od 0,4 do 2,6m. Uspostavljanje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

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

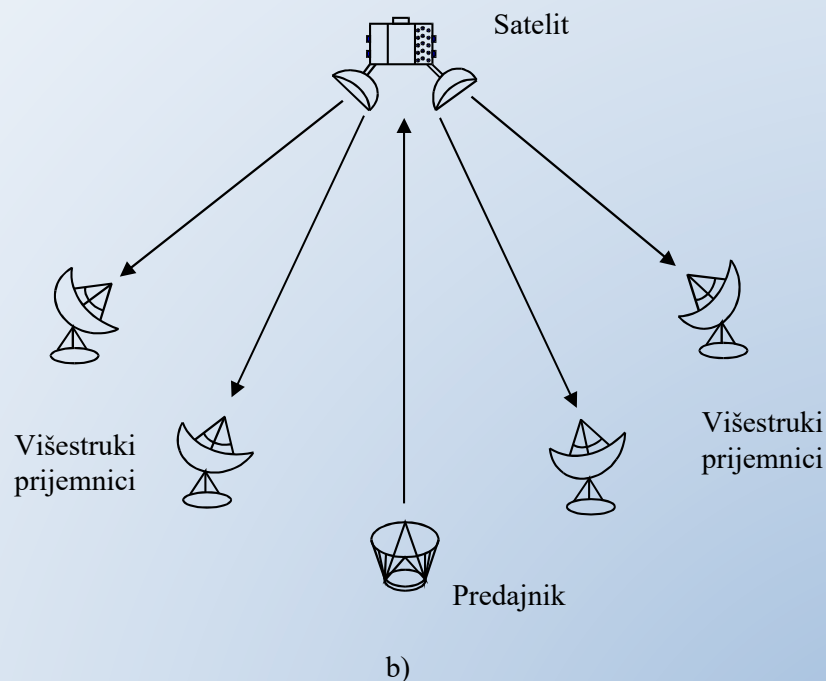
gdje je d rastojanje između antena u kilometrima, h je visina antene, i K je faktor prilagođenja u slučaju da talas prati zakrivljenost Zemljine površine (obično se uzima $K=4/3$).

- **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) Proslijeđivanje 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 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 modulišućim signalom modifikovani nosilac naziva se modulisani signal.

Na mjestu prijema primljeni modulisani signal mora da se podvrgne novoj obradi. Neminovan je inverzan proces: iz modulisanog signala treba “izvući” originalan signal koji nosi poruku. Takav postupak obrade modulisanog signala u prijemnici 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 koda, a demodulator kanalnog dekodera. Zajedničkim imenom, obično se modulator i demodulator nazivaju: **modem**.

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

- Radio prenos 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 (FM)** - 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 se definišu:

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.

PRODUKTNJA MODULACIJA-PRINCIP DOBIJANJA AM SIGNALA

Kod AM nosilac je kontinualan, oblika:

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

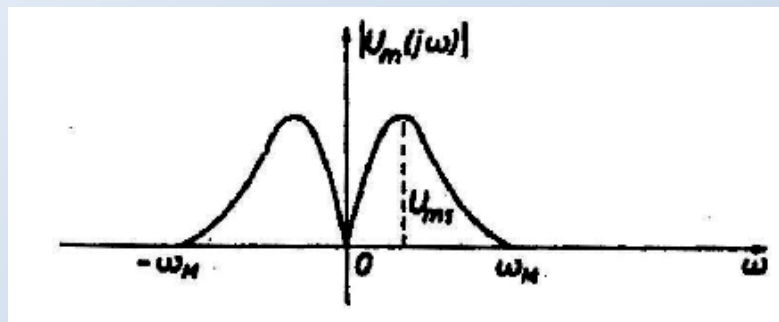
$U_0 = \text{const.}$ je amplituda napona nosioca, $\omega_0 = 2\pi f_0$ njegova kružna učestanost.

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

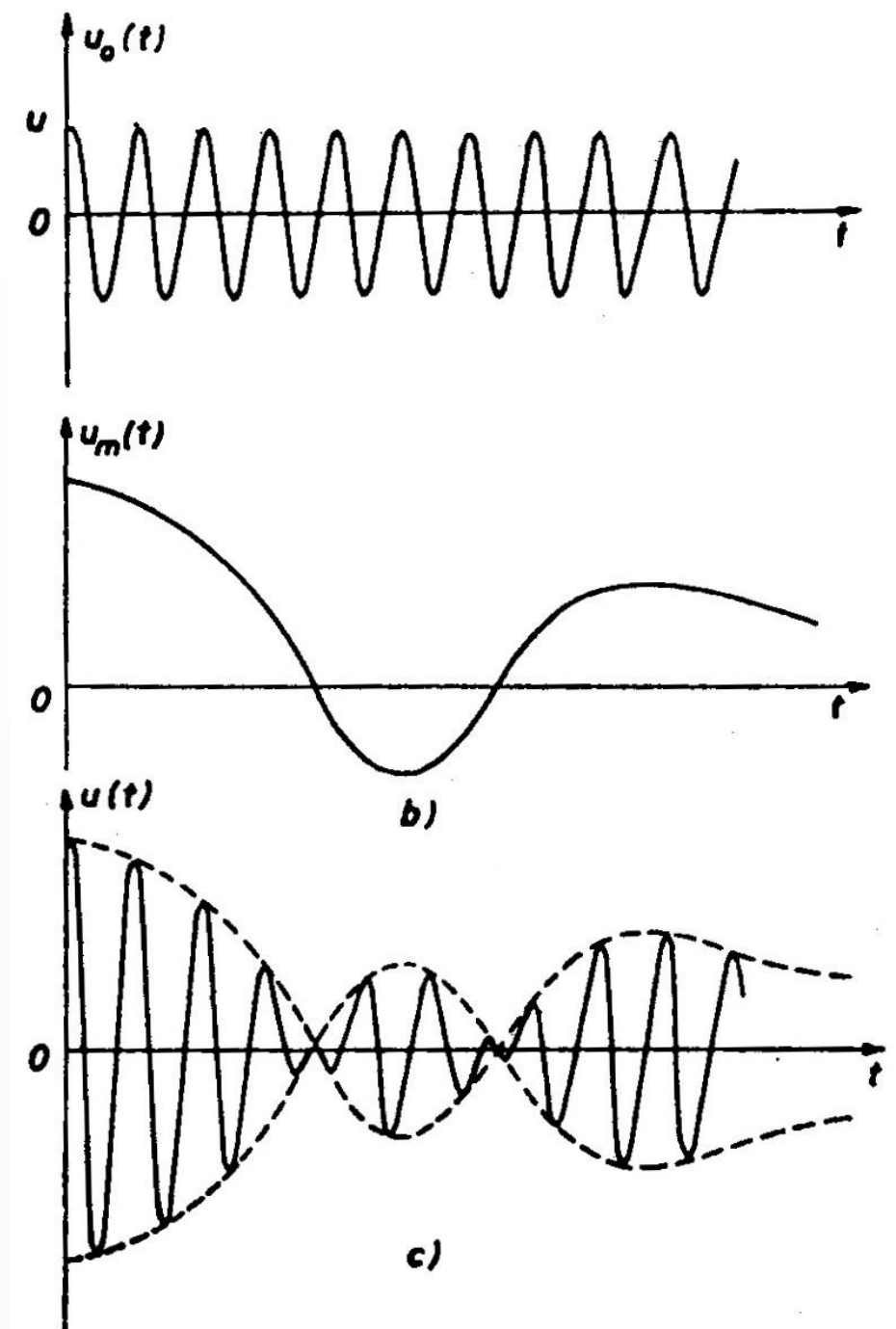
$$U_m(j\omega) = \begin{cases} U_m(j\omega) & |\omega| < \omega_M \\ 0 & |\omega| > \omega_M \end{cases}$$



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.

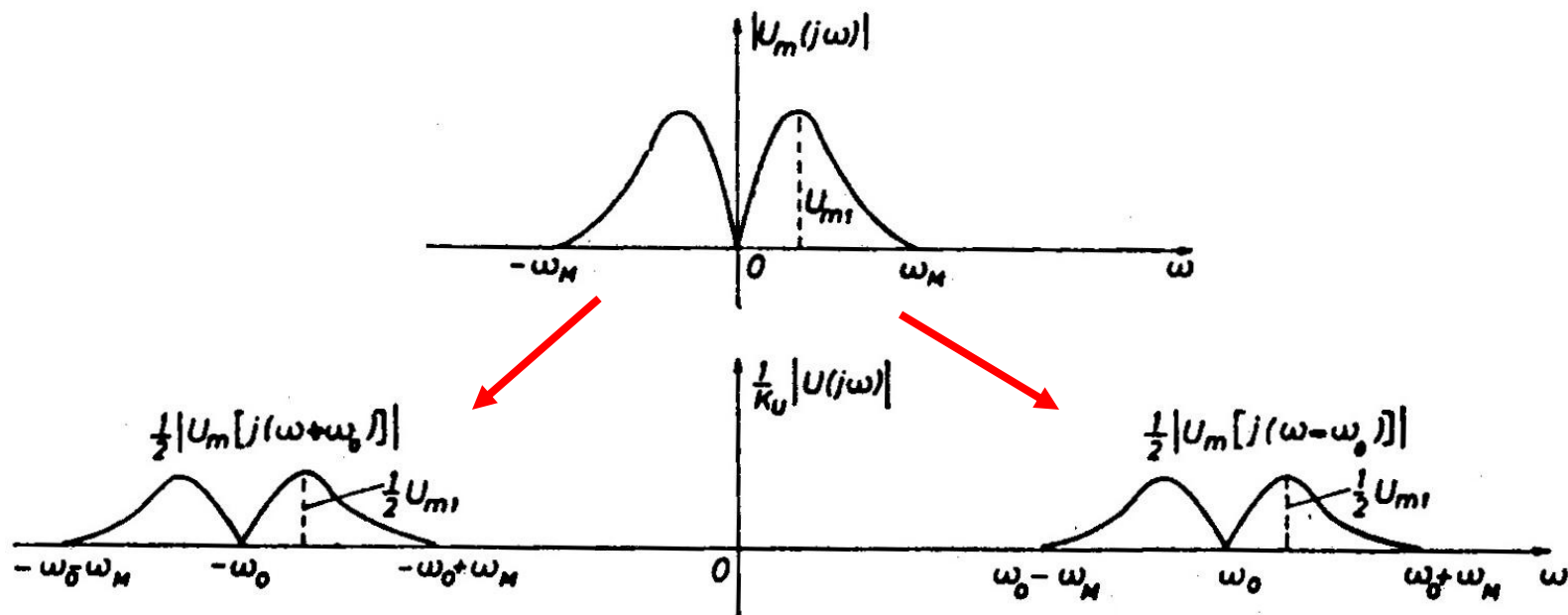
Iz izraza za AM signal vidi se da se on dobija kao proizvod dvije funkcije: $k_U u_m(t)$ i $\cos \omega_0 t$. Stoga se modulacija zasnovana na ovom principu naziva **produktna modulacija**, a sklopovi pomoću kojih se ona realizuje nazivaju se **produktivnim modulatorima**.

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

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

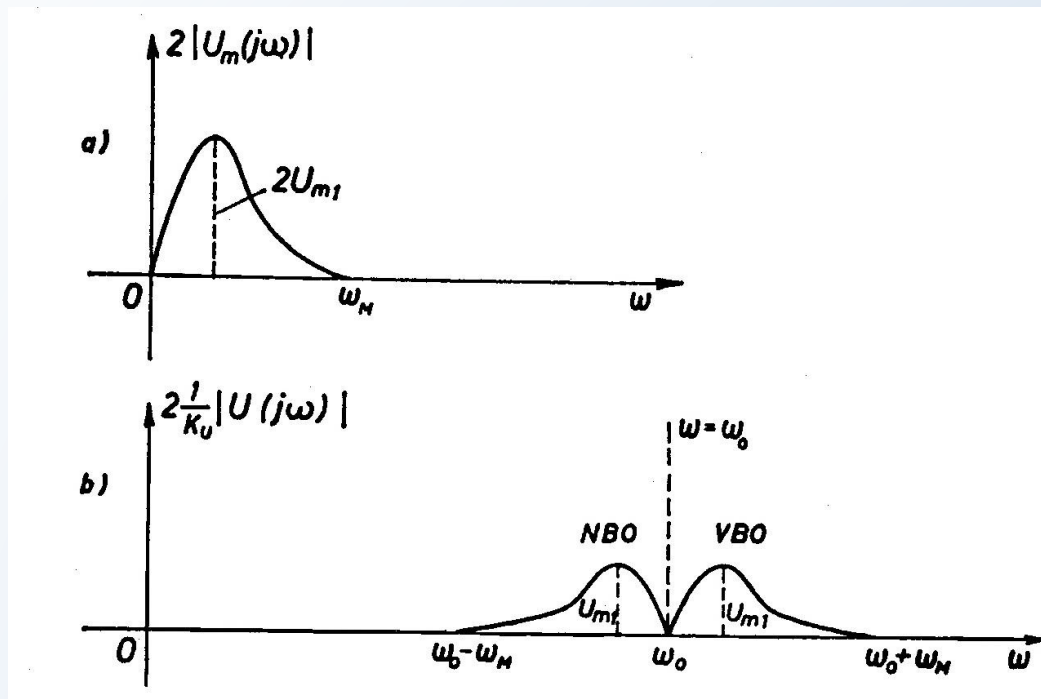
$$U(j\omega) = \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega - \omega_0)] + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega + \omega_0)]$$

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).

REALIZACIJA PRODUKTNE MODULACIJE

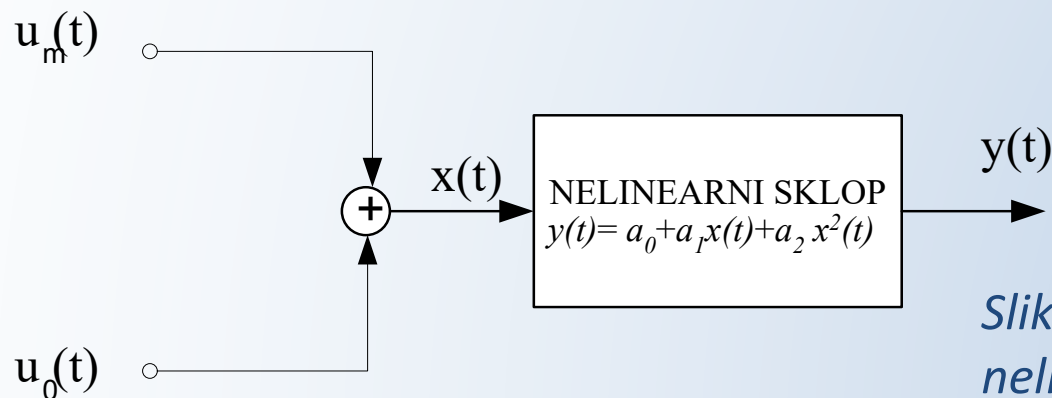
1. POMOĆU NELINEARNIH SKLOPOVA

Svaki električni sklop koji posjeduje nelinearnu karakteristiku "izlaz-ulaz" može da posluži kao produktni modulator.

Pretpostavimo zato da imamo neki nelinearan sklop čija je karakteristika "izlaz - ulaz " data polinomom oblika:

$$y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + \dots$$

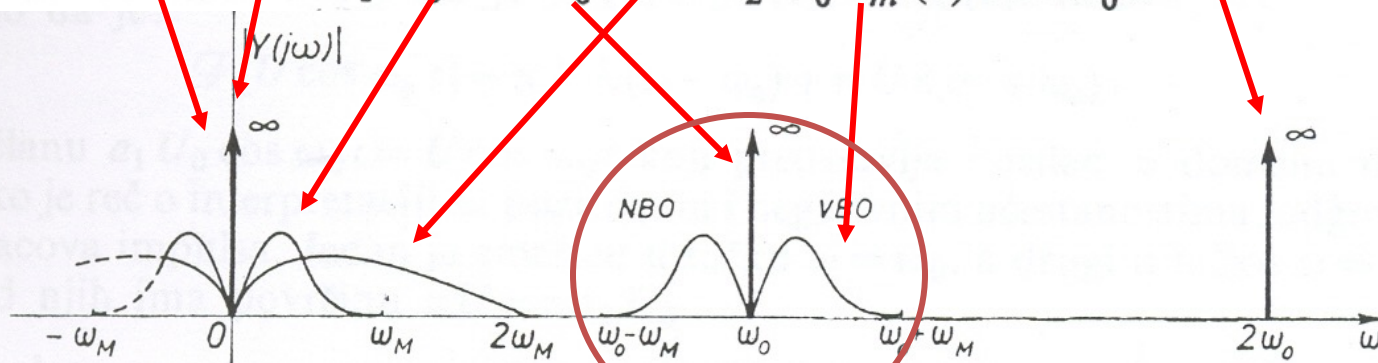
U ovoj relaciji $x(t)$ predstavlja ulazni, a $y(t)$ izlazni signal, dok su a_0 , a_1 , $a_2 \dots$ konstante. U ovom razmatranju, biće pretpostavljena kvadratna karakteristika. Nelinearni sklop se može iskoristiti na sledeći način:



Slika: Realizacija AM pomoću nelinearnog sklopa

Na izlazu iz ovog sklopa se dobija signal oblika:

$$\begin{aligned} y = y(t) &= a_0 + a_1 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)] + a_2 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)]^2 = \\ &= a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 + a_1 u_m(t) + a_2 u_m^2(t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos 2\omega_0 t + \\ &\quad + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + 2 a_2 U_0 u_m(t) \cos \omega_0 t \end{aligned}$$



- Prva dva člana predstavljaju jednosmjernu komponentu (u spektru Diracov impuls na učestanosti 0);
- Treći član predstavlja modulišući signal;
- Četvrti član je kvadrat modulišućeg signala koji ima dva puta širi spektar;
- Peti član je deterministički signal dva puta veću učestanosti od nosioca (Diracov impuls na učestanosti $2\omega_0$);
- Šesti član predstavlja nosilac;
- Poslednji član je korisni produkt modulacije (AM signal).

Znači, svi članovi osim poslednjeg predstavljaju neželjene komponente (parazite) u slučaju koji posmatramo.

Da bi se dobio amplitudski modulisan signal potrebno je iz spektra izlaznog signala izdvojiti željeni član. To se jednostavno može ostvariti pomoću filtra propusnika opsega učestanosti u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0 + \omega_M)$. Pri tome se mora izbjeći eventualno preklapanje ove komponente sa ostalim. Sa slike je jasno da treba da je zadovoljen uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq 2\omega_M \quad \text{tj.} \quad \omega_0 \geq 3\omega_M$$

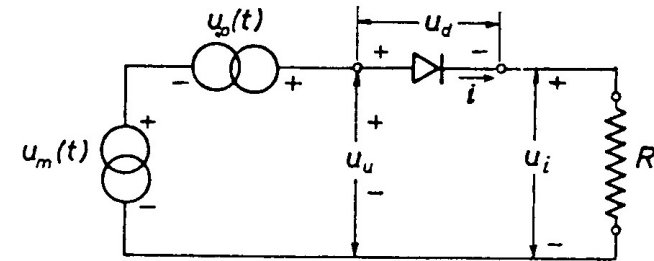
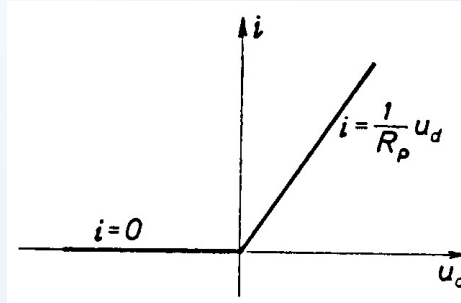
U sredini opsega postoji nosilac, tj. filter propušta dva bočna opsega i nosilac. Nemoguće je napraviti filter koji bi izdvojio samo dva bočna opsega, a ne i nosilac. Zato se za dobijanje AM signala sa dva bočna opsega primjenjuju specijalni postupci. Prisustvo nosioca ne utiče na poruku, ali je “višak” sa stanovišta snage. Ova kombinacija: nosilac, niži i viši bočni opseg naziva se konvencionalni amplitudski modulisani signal (KAM).

Za nelinearni sklop reda 3 povećava se broj komponenti (pored ovih navedenih za 2, još 6 novih), ali ni jedna od njih ne predstavlja korisnu komponentu.

✓ **Zaključak:** Za dobijanje AM signala pomoću nelinearnih sklopova dovoljna je nelinearnost sklopa reda 2.

2. APROKSIMACIJA PRODUKTNE MODULACIJE POMOĆU PREKIDAČKIH SKLOPOVA

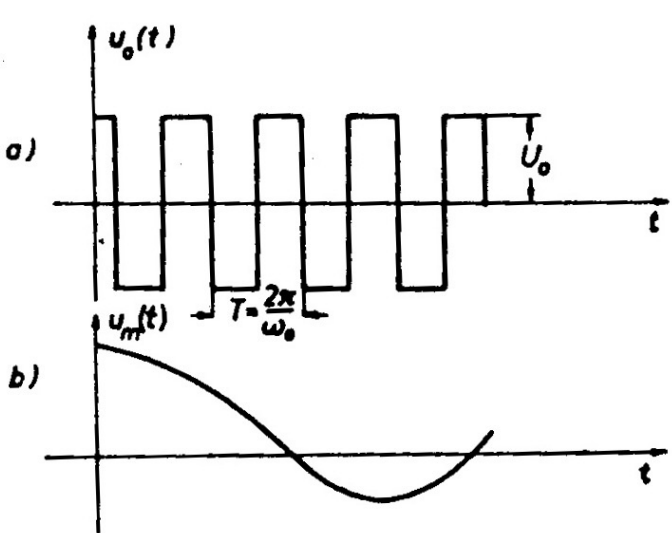
Ovi sklopovi imaju dva režima rada. Najprostiji primjer prekidačkog sklopa je poluprovodnička dioda.



Slika: Idealizovana karakteristika poluprovodničke diode; Tipično kolo linearnog prekidača

U ovom slučaju nosilac nije sinusoidalna funkcija, već je povorka pravougaonih impulsa. Izraz za napon ovog signala može da se nađe na osnovu Fourier-ove analize i ima oblik:

$$u_0(t) = 2 U_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n \pi}{2}}{\frac{n \pi}{2}} \cos n \omega_0 t$$



Za diodu važi:

$$i = \begin{cases} \frac{1}{R_p} u_d & u_d > 0 \\ 0 & u_d \leq 0 \end{cases}$$

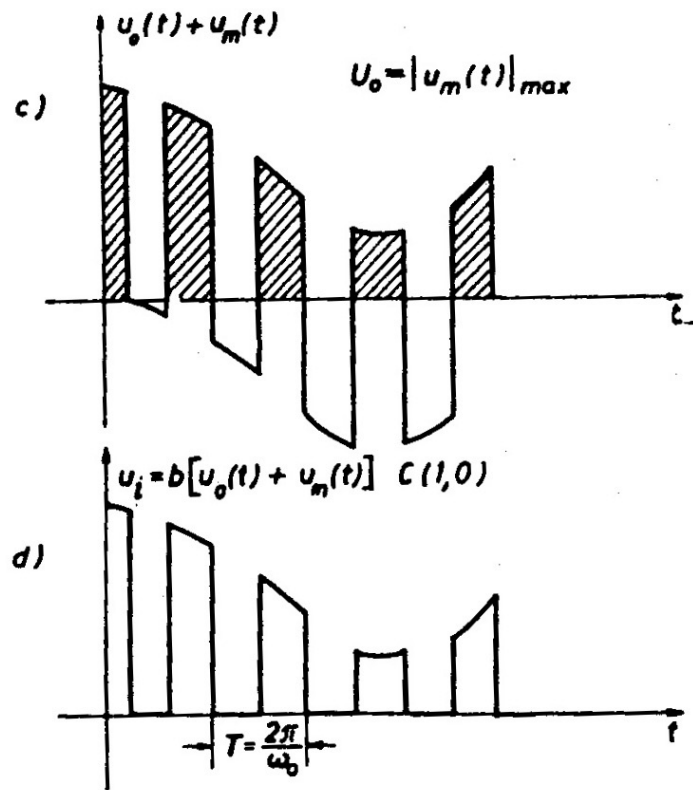
R_p predstavlja otpornost diode u propusnom smjeru. Izlazni napon u_i na otporniku R zavisi od režima rada diode. Kada je u kolu uspostavljen protok el. energije (napon na diodi $u_d > 0$) važi:

$$u_d(t) = -Ri(t) + u_o(t) + u_m(t)$$

tj.

$$u_d(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_p}{R}} [u_o(t) + u_m(t)]$$

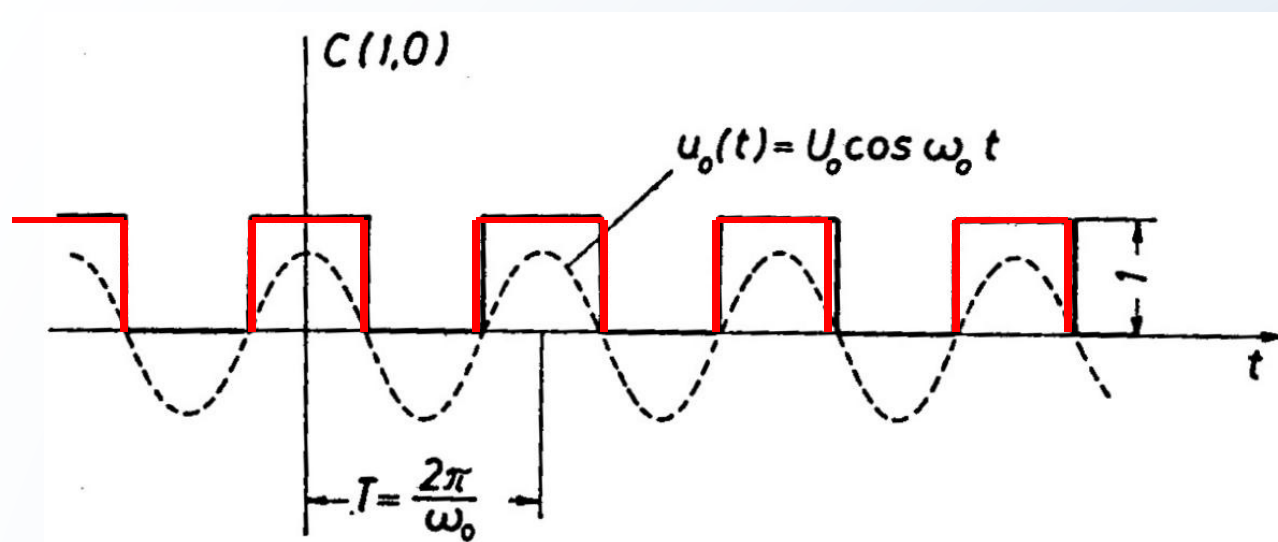
$$u_i(t) = \frac{u_d(t) R_p}{R_p} = \frac{R}{R_p + R} [u_o(t) + u_m(t)]$$



Kada nema protoka el.energije, $u_i=0$.

Slika: Vremenski dijagrami pojedinih napona a) napon nosioca $u_o(t)$; b) modulišući signal $u_m(t)$; c) suma napona $u_o(t) + u_m(t)$; d) talasni oblik izlaznog napona u_i

Sa $C(1,0)$, je označena prekidačka funkcija koja u pozitivnim poluperiodama nosioca ima vrijednost 1, a u njegovim negativnim poluperiodama vrijednost 0.



$$C(1,0) = \begin{cases} 1, & u_o > 0 \\ 0, & u_o < 0 \end{cases}$$

$$C(1,0) = \frac{C(1,-1) + 1}{2}$$

$$C(1,0) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_o t = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_o t - \frac{1}{3} \frac{2}{\pi} \cos 3\omega_o t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \cos 5\omega_o t + \dots$$

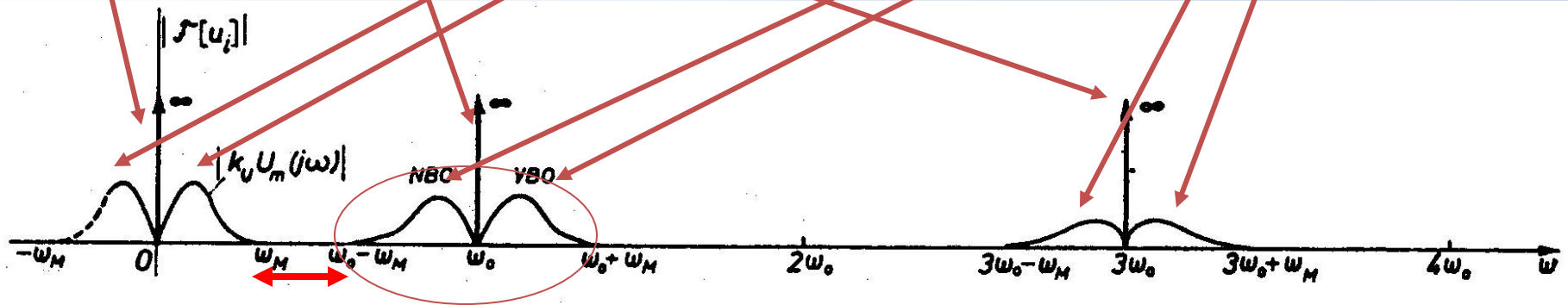
$C(1,-1)$ predstavlja povorku naizmjeničnih pravougaonih impulsa čije su amplitude u pozitivnim poluperiodama jednake 1, a u negativnim -1.

$C(1,0)$ se naziva **prekidačka funkcija**, a $C(1,-1)$ **komutaciona funkcija**.

Sada je izlazni napon oblika:

$$u_i(t) = \frac{R}{R + R_d} (U_0 + u_m(t)) C(1,0) = \frac{R}{R + R_d} (U_0 + u_m(t)) \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t \right) =$$

$$= \frac{RU_0}{2(R + R_d)} + \frac{RU_0}{R + R_d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t + \frac{R}{2(R + R_d)} u_m(t) + \frac{R}{R + R_d} u_m(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t$$



$$\omega_0 \geq 2\omega_M$$

Slika: Spektralna gustina amplituda signala u_i

Iz izraza za izlazni signal, kao i sa slike koja predstavlja njegov spektar, vidi se da se pomoću linearnog prekidača može ostvariti produktna modulacija:

Prvi član u izrazu predstavlja jednosmjernu komponentu, drugi član beskonačno mnogo nosilaca na učestanostima $n\omega_0$, $n=1, 3, 5, \dots$, treći član predstavlja signal poruke, dok poslednji član predstavlja beskonačno mnogo AM komponenti na učestanostima $n\omega_0$ kojima u domenu učestanosti odgovaraju dva bočna opsega lijevo i desno od učestanosti $n\omega_0$.

Da bi se dobio željeni amplitudski modulirani signal pomjeren na učestanost ω_0 potrebno je dobijeni signal propustiti kroz filter propusnik opsega učestanosti $(\omega_0 - \omega_m \div \omega_0 + \omega_m)$. Izdvajanje filtrom će biti usješno ako nema preklapanja komponenti, tj. ako je ispunjen uslov:

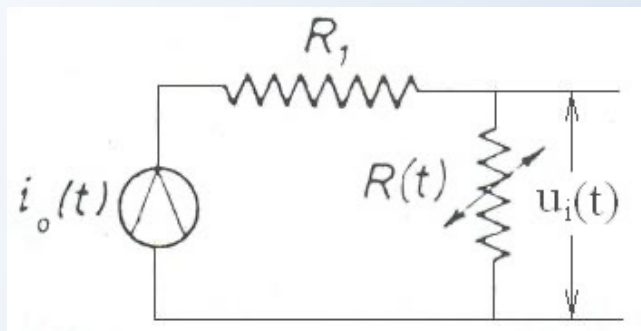
$$\omega_0 - \omega_M \geq \omega_M, \text{ tj. } \omega_0 \geq 2\omega_M$$

Da bi filtriranje bilo uspješno učestanost nosioca mora biti bar dva puta veća od maksimalne učestanosti modulišućeg signala.

3. METODA VARIJACIJE PARAMETARA

Metoda varijacije parametara ili ***parametarska modulacija*** se zasniva na mogućnosti da se neki od parametara linearnog kola mijenja srazmjerno modulišućem signalu. Riječ je o klasi linearnih kola sa vremenski promjenljivim parametrima.

Posmatrajmo neko pasivno linearno kolo sastavljeno od R, L i C elemenata. Ako se jedan, bilo koji, od ovih parametara mijenja u vremenu kaže se da se radi o kolu sa promjenljivim parametrima. Ako se otpornost R otpornika mijenja u vremenu, tako da su njegove promjene srazmjerne modulišućem signalu ($R(t)=ku_m(t)$) tada je izlazni napon oblika $u_i(t)=R(t)i_o(t)$.



Slika: Linearno kolo sa promjenljivim parametrom $R(t)$

Slično je ako se mijenja kapacitivnost kondenzatora ($q(t)=C(t)u(t)$), ili induktivnost kalema ($\varphi(t)=L(t)i(t)$). Međutim, ovakve realizacije nisu našle neku ozbiljniju primjenu u telekomunikacijama. Ovaj metod više teorijski nego praktični značaj jer su elementi mehanički sa velikim stepenom inertnosti.