

3. OBRADA SIGNALA I MULTIPLEKSNI SUSTAVI

3.1. Modulacija analognim signalom

Modulacija je postupak obrade signala kojim se u prijenosni signal utiskuje signal informacije. Na prijemnoj strani se vrši obratni postupak – demodulacija, kao bi se ponovno dobila informacija.

Prijenosni signal ima veću frekvenciju te ima bolja svojstva širenja prijenosnim medijem. Signal informacije zovemo još i modulacijski signal, dok kao rezultat modulacije dobivamo modulirani signal.

Postoji više vrsta modulacija:

- Analogna modulacija signala, kod koje se mijenja jedan od parametara sinusnog signala: amplituda, frekvencija ili faza.

Stoga razlikujemo amplitudnu modulaciju (AM), frekvencijsku modulaciju (FM) i faznu modulaciju (PM).

- Diskretna modulacija ili digitalna modulacija sinusnog signala

- Modulacija impulsnih signala

- Digitalni modulacijski postupci, od kojih su najpoznatiji: Impulsno kodna modulacija (PCM) i delta modulacija (DM).

- Modulacijski postupci za prijenos podataka u radio-difuziji.

U povijesti komunikacija značajnu ulogu je odigrala amplitudna modulacija, koja je danas u svom izvornom obliku gotovo napuštena. Međutim njezina primjena je i dalje prisutna u složenim modulacijskim postupcima. Posebno je pogodna za razumjevanje modulacije uopće.

Frekvencijska modulacija je danas najzastupljenija u radio-difuziji, premda su razvijene i koriste se i druge modulacije odnosno modulacijski postupci koji u sebi sadrže veći broj postupaka i faza obrade signala.

Od velikog broja modulacija ovdje će biti prezentirane:

- amplitudna modulacija (AM)
- frekvencijska modulacija (FM)
- kvadaraturna amplitudna modulacija (QAM)
- impulsno kodna modulacija (PCM) i
- delta modulacija (DM)

3.1.1. Amplitudna modulacija (AM)

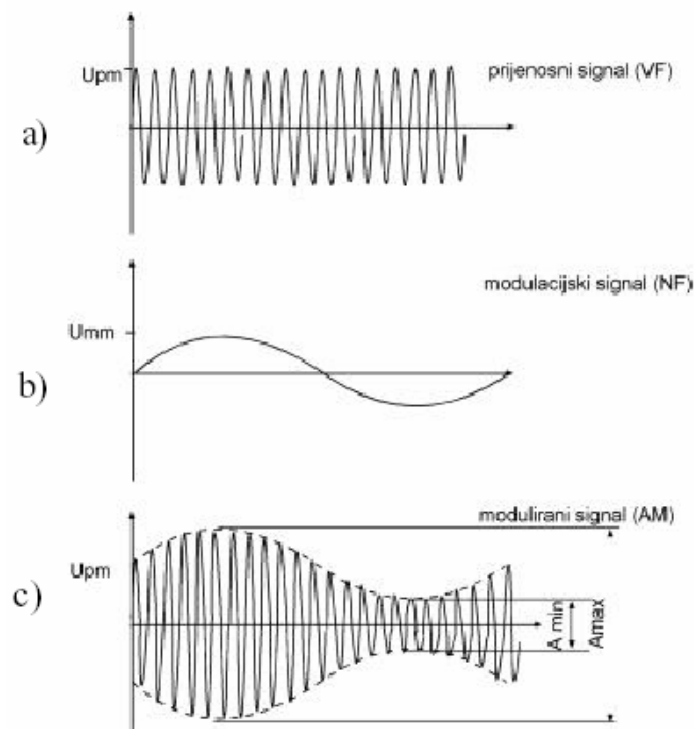
Amplitudna modulacija u svojem početnom, izvornom obliku danas se malo koristi, no principe modulacije uopće, najlakše je razumijeti na primjeru amplitudne modulacije.

Modulacija amplitude prijenosnog signala obavlja se tako da se mijenja amplituda na način i po zakonu promjene modulacijskog signala.

Prijenosni signal je taj koji će nam poslužiti za prijenos informacije (slika 3.1. a).

On sam ne sadrži informaciju. Informacija je sadržana u modulacijskom signalu (slika 3.1.b.).

Modulacijski signal je sam po sebi informacija.



Slika 3.1. Amplitudna modulacija

Matematički oblik prijenosnog signala je: $u_p = U_{pm} \sin(\omega_p t + \Phi_0)$, a modulacijskog: $u_m = U_{mm} \sin \omega_m t$ pri čemu je: $\omega_p = 2\omega_m$, odnosno $f_p \gg f_m$

Na slici 3.1. c prikazan je amplitudno modulirani signal gdje se vidi da se amplitudna modulacija dobiva tako što modulacijski signal utiče na amplitudu prijenosnog signala te je mijenja na način i prema zakonu po kojem se mijenja amplituda modulacijskog signala.

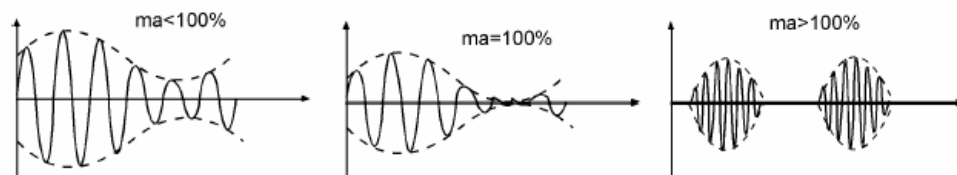
Jedan od važnih parametara modulacije je dubina modulacije ili indeks modulacije.

Indeks modulacije ili dubina modulacije je omjer između najveće promjene amplitude modulacionog signala i najveće promjene amplitude prijenosnog signala. On pokazuje koliki je taj utjecaj modulacijskog signala na amplitudu prijenosnog signala. Izračunava se prema slijedećoj formuli:

$$m_a = \frac{U_{mm}}{U_{pm}}$$

Gdje su U_{mm} – amplituda modulacijskog signala, a U_{pm} – amplituda prijenosnog signala veličine prikazane na slici 3.1. c, a indeks modulacije se može dobiti i iz odnosa A_{max} i A_{min} koji se također može vidjeti na istoj slici.

Na slici 3.2. prikazan je izgled AM signala za različite dubine modulacije:



Slika 3.2. Izgled AM signala za različite dubine modulacije

3.1.2. Spektralni prikaz AM signala

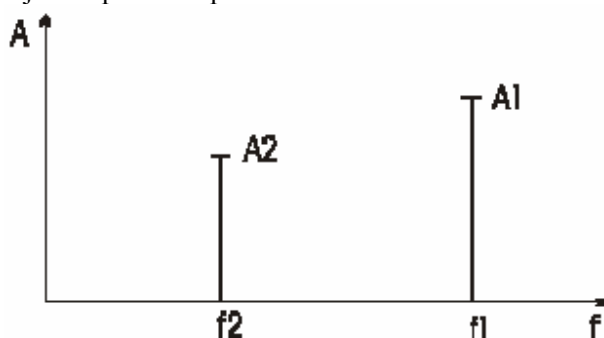
Za razumjevanje pojava izmjeničnih struja potrebno je znati kako se strujni krugovi ponašaju kod promjene frekvencije, a to se može preko **spektra signala**.

Prema definiciji, to je takav prikaz signala u kojem se vidi ovisnost amplitude signala o njegovoj frekvenciji. Taj prikaz može biti čisto matematički, ali je grafički pogodniji.

Pretpostavimo da imamo dva neovisna signala i to:

- Sinusni signal čija je amplituda A_1 i frekvencija f_1 (ω_1) i
- Sinusni signal čija je amplituda A_2 i frekvencija f_2 (ω_2), pri čemu je $A_1 > A_2$ i $f_1 > f_2$.

Njihov spektralni prikaz biti će kao na slici 3.3.



Slika 3.3. Spektralni prikaz dva zadana sinusna signala

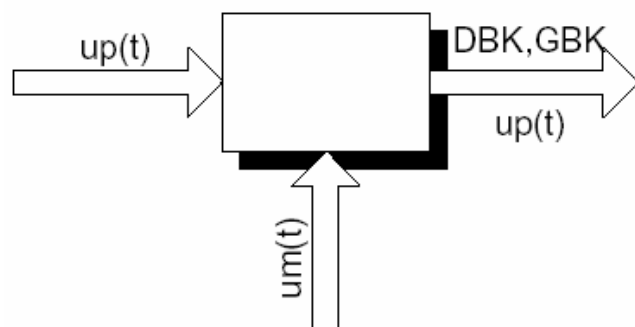
U procesu amplitudne modulacije na ulazu u modulator (slika 3.4.) imamo prijenosni signal $u_p(t)$, modulatorski signal $u_m(t)$, a na izlazu iz modulatora imamo tri signala:

- signal amplitude $\frac{m_a}{2} U_{pm}$ sa frekvencijom $f_p - f_m$, kojeg zovemo **donja bočna komponenta (DBK)** AM signala

- signal amplitude $\frac{m_a}{2} U_{pm}$ sa frekvencijom $f_p + f_m$, kojeg zovemo **gornja bočna komponenta (GBK)** AM signala, te

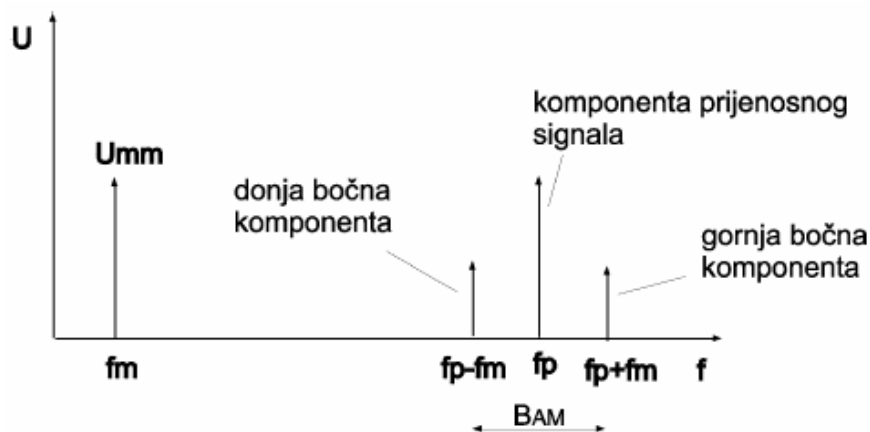
- nepromijenjen **prijenosni signal** sa amplitudom U_{pm} i sa frekvencijom f_p .

- nepromijenjen **prijenosni signal** sa amplitudom U_{pm} i sa frekvencijom f_p .



Slika 3.4. Blok shema AM modulatora sa pripadajućim signalima

Prema tome, kod modulacije jednom frekvencijom imati ćemo spektar signala prema slici 3.5.



Slika 3.5. Spektar AM signala kod modulacije jednom frekvencijom

Međutim, informacija redovito sadrži niz frekvencija i niz amplituda tako da se spektar signala informacije prikazuje u obliku trokuta ili trapeza.

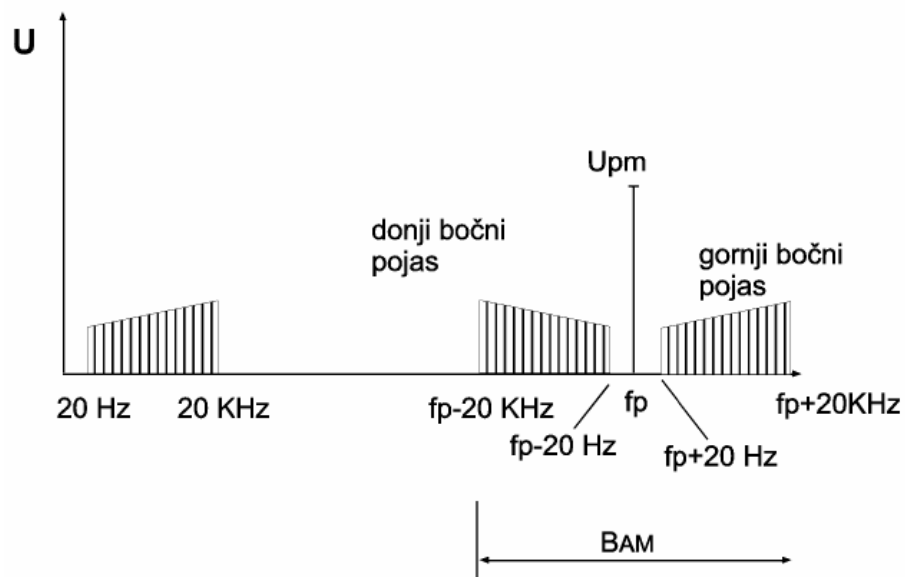
Prijenosni signal $u_p(t)$ sada se modulira nekom zvučnom informacijom koja, kao što znamo, obuhvaća pojas od 20 Hz do 20 kHz (slika 3.6.).

Općenito za amplitudnu modulaciju, napon u vremenskoj domeni je:

$$u(t) = U_p \cos \omega_p t + 1/2 m_a U_p \cos(\omega_p + \omega_m)t + 1/2 m_a U_p \cos(\omega_p - \omega_m)t$$



Složeni modulirani signal može se razložiti na tri jednostavne komponente, tj. na tri jednostavna harmonička oblika. (To vrijedi samo za najjednostavniji slučaj, tj. kada u modulator ulazi modulacijski signal samo jedne frekvencije.)



Slika 3.6. Spektar AM signala kod modulacije pojasom frekvencija

Važan podatak kod svakog signala je širina pojasa frekvencija **B** kojeg on zauzima. U pravilu teži se da ona bude što manja, kako se ne bi narušila kvaliteta informacije.

Za AM signal, širina pojasa B_{AM} je:

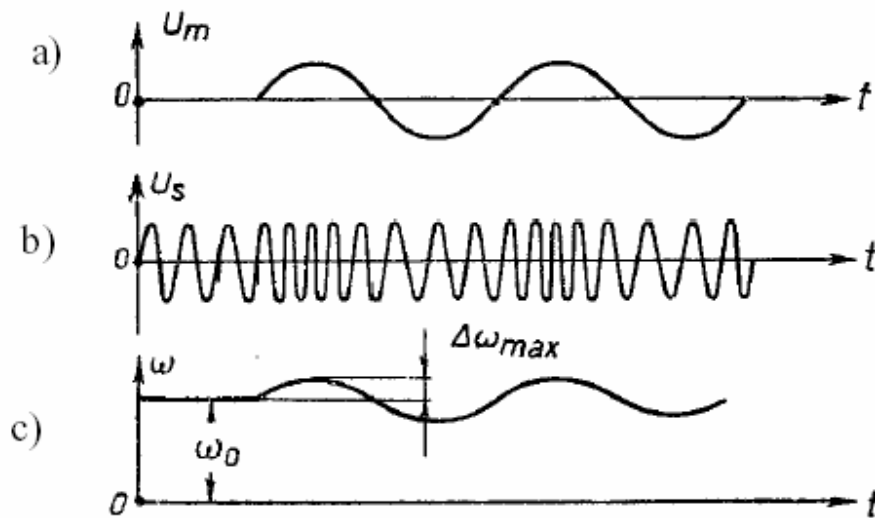
$$B_{AM} = 2f_{m \max}$$

Gdje je $f_{m \max}$, maksimalna frekvencija modulacijskog signala (u našem primjeru $B_{AM} = 40$ kHz).

3.1.3. Frekvencijska modulacija (FM)

Frekvencijska modulacija nastaje kada se mijenja trenutna frekvencija prijenosnog signala proporcionalno promjeni razine modulacijskog signala.

Vremenski prikaz FM signala prikazan je slikom 3.7.



Slika 3.7. Vremenski prikaz FM signala

Na slici 3.7.a je prikaz modulacijskog signala koji ima oblik sinusoide. Na slici 3.7.b se vidi promjena frekvencije prijenosnog signala pri čemu se frekvencija za pozitivnu poluperiodu modulacionog signala povećava, a za negativnu smanjuje.

Na slici 3.7.c dijagram prikazuje promjenu frekvenciju oko neke srednje vrijednosti ω_0 .

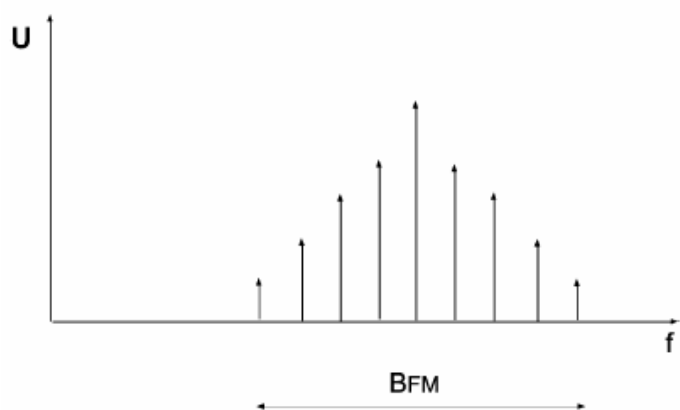
Maksimalnu promjenu frekvencije nazivamo devijacija frekvencije $\Delta\omega$ (Δf).

Indeks frekvencijske modulacije m_f se definira kao omjer devijacije frekvencije i frekvencije modulacijskog signala.

$m_f = \Delta f / f_m$, gdje je:

Δf – devijacija frekvencije, a

f_m – frekvencija modulacijskog signala



Slika 3.8. Spektar FM signala

Širina spektra FM signala prikazana je slikom 3.8. i mnogo je veća nego širina spektra AM signala.

U procesu frekvencijske modulacije javlja se niz komponenata lijevo i desno od prijenosne frekvencije na međusobnim udaljenostima koje se razlikuju za f_m , no njihove amplitude brzo opadaju tako da se uzima širina spektra koja pripada amplitudi od maksimalno 1 % amplitude prijenosnog signala.

$$B_{FM} = 2 f_m (m_f + 1) \text{ ili}$$

$$B_{FM} = 2 \Delta f$$

3.1.4. Fazna modulacija

Frekvencijsku modulaciju (FM) i faznu modulaciju (PM), zajedničkim imenom nazivamo modulaciju argumenta.

Ako imamo signal oblika $U_0(t) = U_{m0} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, izraz u zagradi predstavlja argument funkcije ili kut, pa se ove modulacije nazivaju i kutnim.

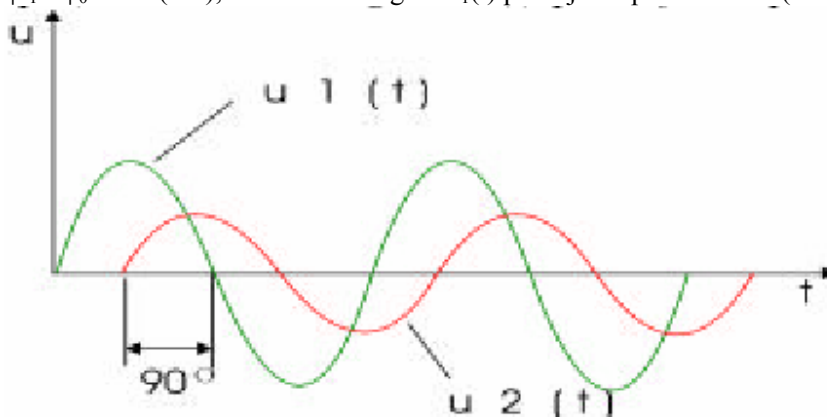
Referentnom fazom φ_0 ćemo smatrati onu koja će služiti samo za usporedbu sa nekim drugim sličnim signalom. Ako se usporedba ne mora obaviti, može se smatrati da je $\varphi_0 = 0$.

Ako je drugi signal oblika:

$U_1(t) = U_{m1} \sin(\omega_0 t + \varphi_1)$, vidi se da su frekvencije oba signala jednake (ω_0), a različite su amplitude i faze.

Neka je, na primjer, razlika između faza φ_1 i φ_0 ,

$\varphi_1 - \varphi_0 = 90^\circ (\pi/4)$, što znači da signal $u_1(t)$ prednjači upravo za $\pi/4$ (slika 3.9.).

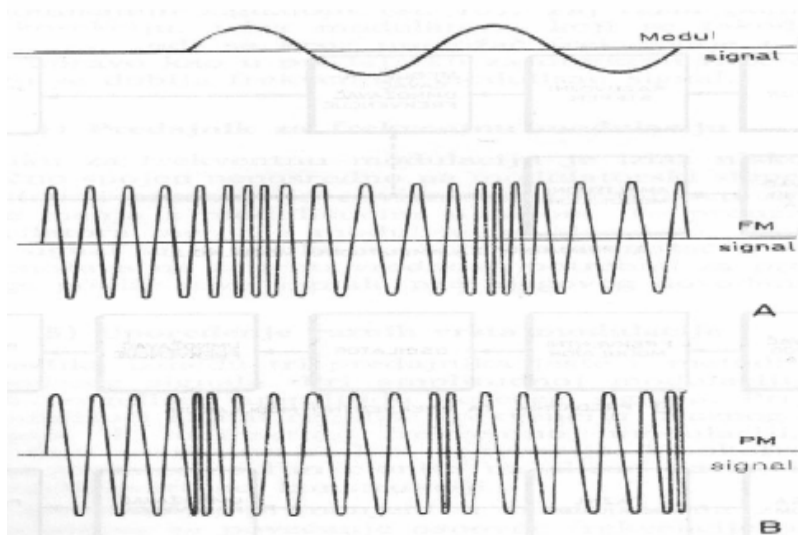


Slika 3.9. Fazni pomak između dva napona

Dakle biti će riječi o promjeni frekvencije i faze prijenosnog signala proporcionalno promjeni amplitude modulacijskog signala, s ciljem prijenosa informacije.

Na slici 3.10. su prikazi FM i PM signala uz odgovarajući modulacijski signal u vremenskom području.

Vidi se da su prikazi FM i PM signala identični.

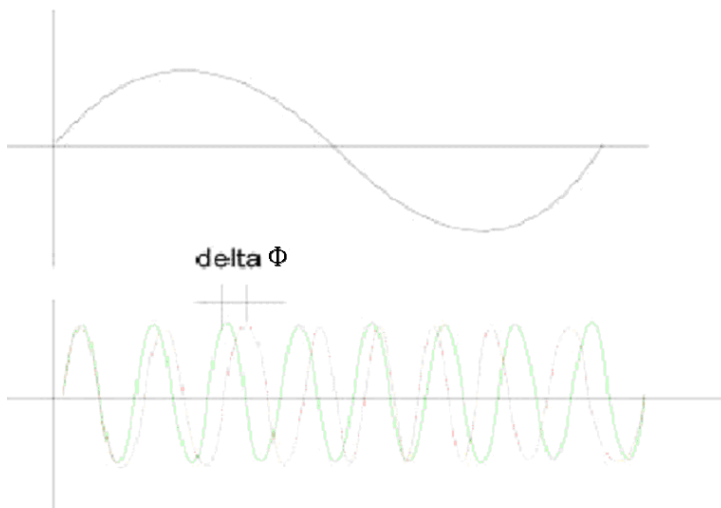


Slika 3.10. Frekvencijska i fazna modulacija

Iz toga slijedi kako se faznom modulacijom ujedno dobiva i FM signal, a frekvencijskom modulacijom se dobiva PM signal.

Koja je onda razlika među njima?

Kod PM-a je promjena faze proporcionalna promjeni amplitude modulacijskog signala, a kod FM je promjena frekvencije proporcionalna promjeni amplitude modulacijskog signala.



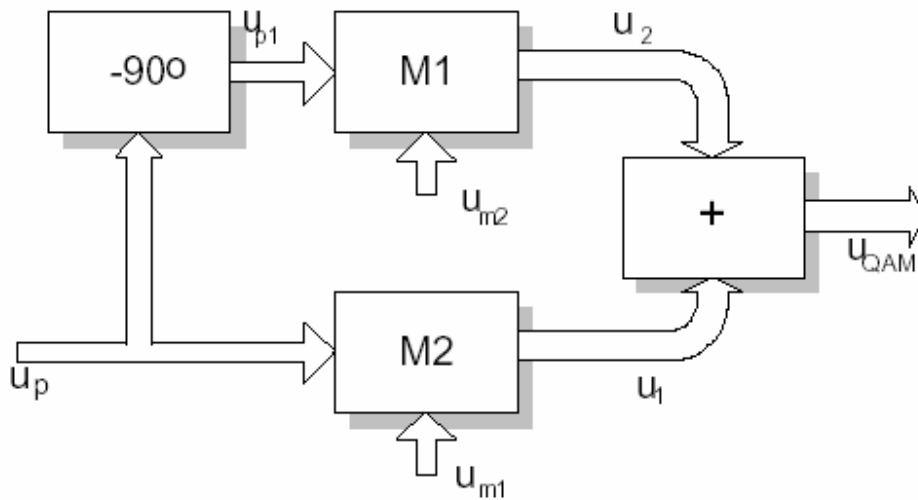
Slika 3.11. Fazna modulacija

Oba signala imaju identičan spektar.

Širina spektra teoretski je beskonačna, a komponente su na međusobnoj udaljenosti f_m . Amplitude ovih komponenti brzo opadaju te se u obzir uzimaju samo one čija je snaga unutar 1% snage prijenosnog signala.

3.1.5. Kvadraturna amplitudna modulacija QAM

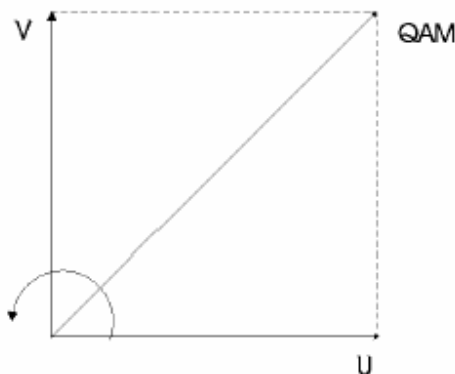
Kvadraturna amplitudna modulacija ili QAM je složeniji modulijski postupak, koji se koristi kod prijenosa TV signala i kod prijenosa digitalnih signala. Ovom modulacijom postiže se to da se istom prijenosnom signalu, pomoću amplitudne modulacije, utiskuju dva modulijska signala (slika 3.12.).



Slika 3.12. Blok shema dobivanja QAM signala

Modulijski signal u_{m1} modulira amplitudu prijenosnog signala u_p , dok istovremeno modulijski signal u_{m2} , modulira amplitudu signala, koji je relativno fazno pomaknut za 90° u odnosu na signal u_p .

QAM signal se dobije zbrajanjem ta dva signala dakle sinusoide i kosinusoide istih frekvencija. Rezultantni modulirani signal u_{QAM} , će dakle imati promjenjivu amplitudu, ali i fazu u odnosu na nemodulirani signal (slika 3.13.).

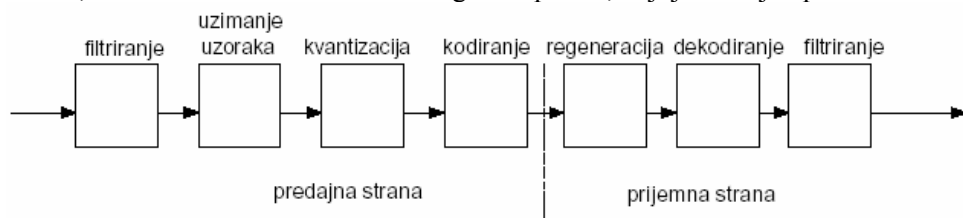


Slika 3.13. Vektorski prikaz QAM signala

U i V su trenutne vrijednosti amplitude pojedinih moduliranih signala, a QAM je amplituda rezultantnog signala.

3.1.6. Pulsno-kodna modulacija (PCM)

Diskretne modulacije u koje spada i PCM (slika 3.14.) imaju tu veliku prednost što su izvanredno otporne na smetnje. Štaviše diskretno modulirani signal se može skoro u potpunosti regenerirati ako je došlo do njegove promjene u određenim granicama pod utjecajem smetnji. PCM se često koristi, osobito u sustavima vremenskog multipleksa, koji je kasnije opisan.



Slika 3.14. Blok shema dobivanja i prijena PCM signala

PCM se temelji na tri osnovna procesa (slika 3.14.):

- uzorkovanje
- kvantiziranje i
- kodiranje

1. Uzorkovanje (sampling)

Uzorkovanjem uzimamo mjeru signalu na ekvidistantim razmacima.

To znači da svakih nekoliko mikrosekundi mjerimo iznos signala i uzimamo u tom trenu uzorak signala kakav on jest (slika 3.15.a,b).

Uzorkovanje se vrši po Shannon-ovom teoremu prema kojem frekvencija uzorkovanje mora biti barem dva puta veća od najveće frekvencije signala kojeg uzorkujemo.

$$f_s = 2x f_g$$

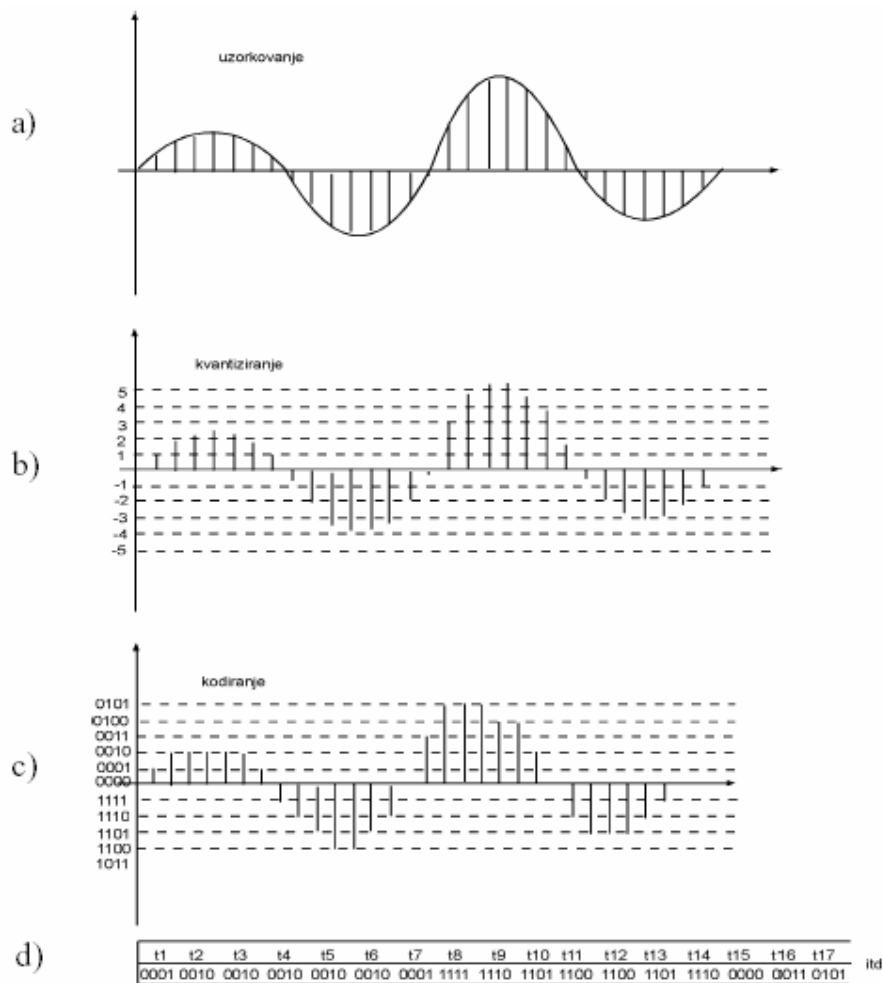
Ovako uzorkovani signal može se na prijemnoj strani besprijekorno regenerirati u svoj originalni oblik.

2. Kvantiziranje

Kvantiziranjem pridružujemo svakoj vrijednosti uzorka neku najbližu unaprijed zadanu vrijednost (slika 3.15. c).

3. Kodiranje

Kodiranjem pridajemo svakom kvantiziranom uzorku dvokomplementni binarni kod (slika 3.15. d).



Slika 3.15. Proces nastanka PCM signala

Šum kvantiziranja

Zbog pridavanja kvantiziranih vrijednosti uzorcima, obavezno se javlja odstupanje od originalnog signala, koje se očituje kao šum kvantiziranja.

On se izražava, kao i svaki šum, kroz odnos S/N (signal/šum).

$$S/N = 6,02 \times n + 1,76 \text{ (dB)}$$

Vidimo da je odnos S/N bolji ako povećamo broj uzoraka.

Primjer:

Za snimanje muzičkih CD-a koristi se PCM, pri čemu je broj bitova $n = 16$.

Na osnovu toga utvrđujemo da je broj razina kvantizacije $2^n = 65536$.

Za ove uvjete, odnos signal šum ima vrijednost 98,08 dB.

Radi usporedbe kod magnetskog snimanja zvuka analognim postupkom kod profesionalnih uređaja, odnos signal-šum kreće se oko 60 dB.

3.1.7. Delta modulacija (DM)

Delta modulacija spada među diskretne, odnosno digitalne modulacije.

Kod PCM se može lako uočiti, da prilikom uzorkovanja, ukoliko je ono obavljeno s dovoljnom frekvencijom, među uzorcima signala postoji određena veza, tj amplituda se znatnije ne mijenja.

Ta povezanost je tim veća što je veća frekvencija uzoraka. Nameće se zaključak da je dovoljno promatrati samo razliku između veličine susjednih uzoraka tj. je li sljedeći uzorak veći, manji ili jednak prethodnome.

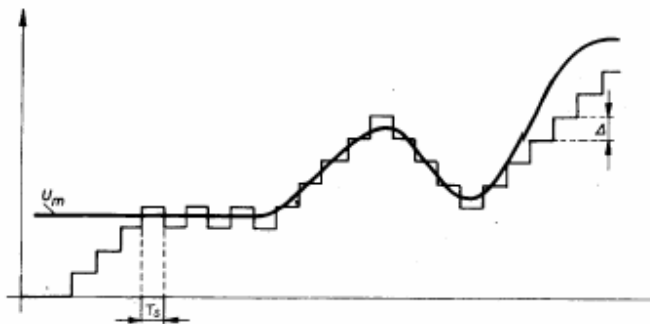
Taj postupak se zove diferencijalna kvantizacija.

Kod delta modulacije (DM) ne upotrebljavaju se podaci o apsolutnim razinama signala u trenucima uzimanja uzoraka, već samo podaci o predznaku promjene signala.

Na ulaz u delta modulator se dovodi analogni signal informacije.

Delta modulator sam sekvencijalno generira uzorke signala ΔU , u vremenskim razmacima T_s , počevši od neke slučajne razine, uspoređuje ih sa signalom informacije pokušavajući ga "uhvatiti" (slika 3.16.)

Ako je razina trenutnog uzorka veća od razine prethodnog modulator će na svom izlazu generirati signal koji odgovara znaku «1», a ako je ona niža tada se generira «0». Ukoliko nema promjene u razini signala, naizmjenice se ponavljaju znakovi «1» i «0».



Slika 3.16. Princip nastanka DM signala

Na izlazu iz delta modulatora imat ćemo u prikazanom primjeru:

11110101011111000001111111

Pogreška kvantizacije u DM sustavu

U sustavima sa DM nastaju dvije vrste pogrešaka kvantizacije:

- izobličenje signala zbog preopterećenja strminom i
- granulacijski šum

Preopterećenje strminom nastaje kada je korak ΔU premalen da bi slijedio nagle promjene ulaznog signala (v. zadnji dio krivulje na prethodnoj slici)

Granulacijski šum je posljedica prevelikog koraka ΔU zbog čega signal varira oko stvarne razine ulaznog signala.

Ova modulacija je najprikladnija za modulaciju govornog signala.

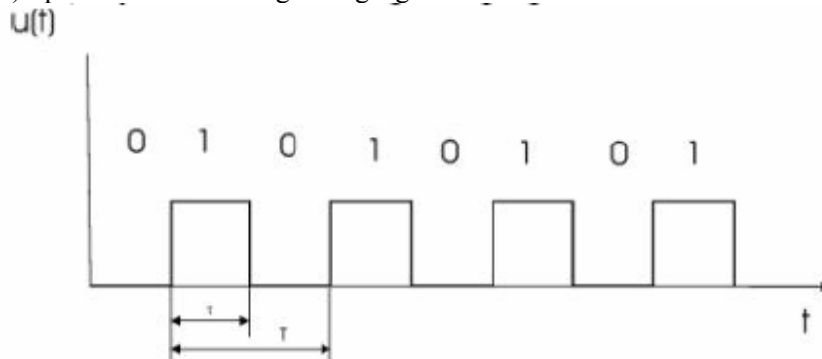
Kako bi se izbjegle ove pogreške koristi se ADM – adaptivna delta modulacija.

Kod ove modulacije razlikuju se brze i spore promjene ulaznog signala, tako da se kod sporih promjena ulaznog signala uzima manji korak ΔU , a kod naglih promjena veći korak ΔU .

3.1.8 Diskretna modulacija sinusnog signala

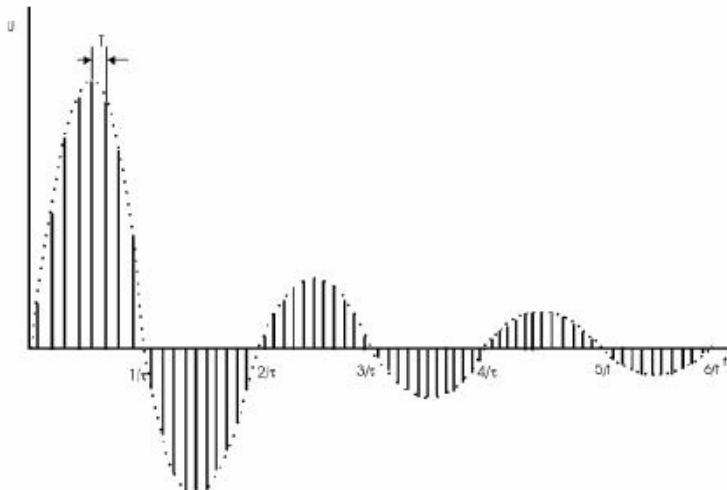
Digitalnu informaciju predstavljamo digitalnim električnim signalom. To je signal koji se sastoji od diskretnih stanja amplitude, kako je to prikazano slikom 3.17. U većini slučajeva to su «1» i «0». Takav električni signal možemo prenositi izravno na takav način da ga kao različite naponske razine uputimo preko nekog fizičkog voda do primatelja. Drugi je način da njime izvršimo modulaciju prijenosnog signala sinusnog oblika te ga kao takvog šaljemo fizičkim medijem (vodič) ili slobodnim prostorom (radio valovi)

a) Spektralne osobine digitalnog signala



Slika 3.17. Vremenski prikaz digitalnog signala

Iz teorije znamo da pravokutni impulsi sadrže velik broj harmoničkih komponenti i zauzimaju opseg frekvencija koji je vrlo širok (teoretski – beskonačno). Spektar jednog pravokutnog impulsa prikazan je na slici 3.18.



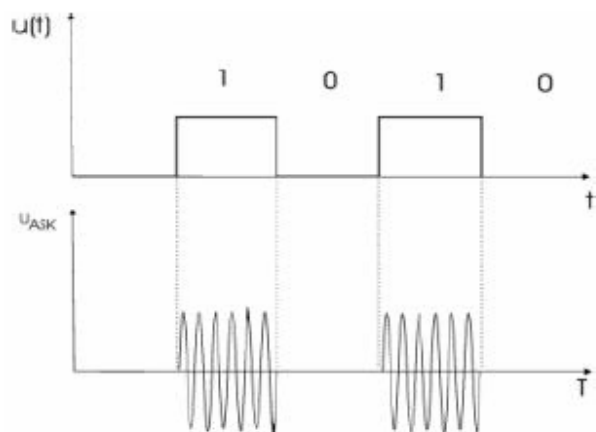
Slika 3.18. Spektar pravokutnog impulsa

Zbog velike širine spektra njihov bi prijenos bio vrlo neekonomičan, pa se pravokutni impuls mora najprije prikladno obraditi.

Pogledajmo tri osnovne vrste digitalne modulacije sinusnog signala.

b) Diskretna modulacija amplitude -ASK (Amplitude Shift Keying)

Ovo je najstarija diskretna modulacija a prikazana je na slici 3.19.



Slika 3.19. Diskretna modulacija amplitude

U vremenskom intervalu modulacijskog signala koji pripada znaku «1», modulirani signal ima amplitudu U_{pm} i frekvenciju f_p , a u intervalu koji odgovara znaku «0», amplituda moduliranog signala jednaka je nuli.

Spektar takvog signala i dalje zauzima beskonačnu širinu pojasa.

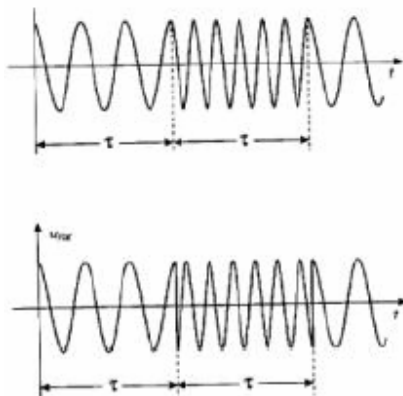
c) Diskretna modulacija frekvencije - FSK (Frequency Shift Keying)

Ovaj se modulacijski postupak temelji na tome da se svakom stanju binarnog digitalnog signala dodijeli jedna diskretna frekvencija prijenosnog signala (slika 3.20.).

Obično se stanju «1» dodijeli frekvencija f_1 , a stanju «0» frekvencija f_0 , pri čemu je $f_1 > f_0$.

Ova se pojava koristi danas veoma mnogo, a modulacijski postupak kojim se dobiju najbolji rezultati naziva se GMSK.

Ako imamo dva oscilatora koja naizmjenice generiraju frekvencije f_1 i f_0 , imat ćemo i diskontinuitet faze



Slika 3.20. Diskretna modulacija frekvencije

Spektar FSK signala također je beskonačno širok.

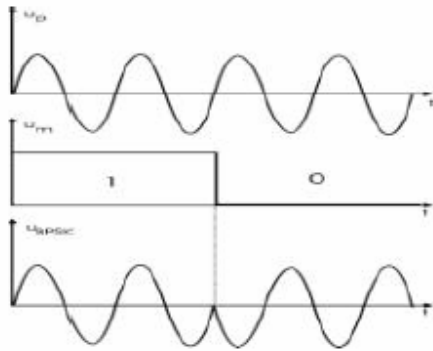
d) Diskretna modulacija faze- PSK (Phase Shift Keying)

Kod ove modulacije se binarnim znakovima 1 i 0 pridaju diskretne vrijednosti faze koje su točno definirane. Kao referentna uzima se faza prijenosnog signala.

Na primjer, znaku «1» pridajemo fazu 0° , a znaku «0» pridajemo fazu 180° , odnosno π .

Ovaj modulacijski postupak možemo jednostavno usporediti sa QAM, uz napomenu da imamo dva prijenosna signala fazno pomaknuta za 180° , a modulacijski signal poprima samo dvije amplitude.

Vremenski prikaz tako moduliranog BPSK signala imamo na slici 3.21.

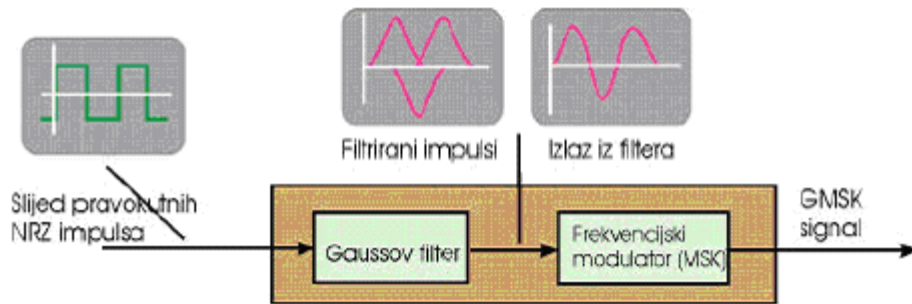


Slika 3.21. Vremenski prikaz BPSK

Dobra strana ovog modulacijskog postupka je to što je otporna na smetnje, a druga je prednost ovog modulacijskog postupka u obliku spektra ovoga signala.

Ukoliko se prije samog modulacijskog postupka, modulacijski signal propusti kroz tzv. Gaussov niskopropusni filter, spektar će biti još boljih karakteristika.

Impuls koji propustimo kroz Gaussov filter ima karakterističan «zvonasti» oblik .



Slika 3.22. Blok shema GMSK sustava

Kao rezultat ovog modulacijskog postupka dobivamo ustvari fazno modulirani signal, kojem se faza mijenja postupno, čime se dobiva spektar vrlo povoljan u pogledu širine i prigušenja nepoželjnih spektralnih komponenata.

Primjena GMSK danas je vrlo proširena, tako da je za prijenos podataka žičnim i bežičnim vezama nezaobilazan. Posebno je interesantan i zato što se primjenjuje u mobilnim komunikacijama – GSM, a time i na željeznici (GSM-R).