

**MODULATSIOONI LIIGID.....2**

MODULEERIMINE .....2  
AMPLITUUDMODULATSIOON.....2  
FAASMODULATSIOON .....3  
SAGEDUSMODULATSIOON .....4  
PULSSMODULATSIOON .....6

# Modulatsiooni liigid

## Moduleerimine

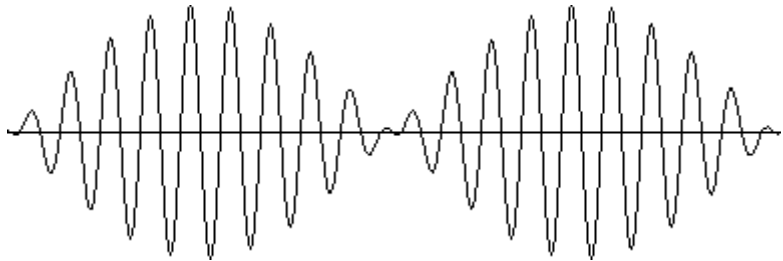
Moduleerimine on protsess, millega saatjas genereeritud kõrgsageduslikku võimsust muudetakse ülekantava signaali rütmis. Moduleerimise vaheaegadel saatjast väljakiirgub konstantse väärtusega võimsus on kandevlaine ehk kandevasagedus, mida on vaja vaid selleks, et temas moduleerimisprotsessi kestel tekitatud muutused üle kanda vastuvõtjani, kus neist muutustest taastatakse kasutatud signaalide algkuju.

Tüüpilises raadiosaates on moduleeriva signaali algkujuks helisageduslikud võnkumised, mis mikrofoni abil muudetakse amplituudilt ja sageduselt vastavaks vahelduvvooluvõimsuseks. Kuna mikrofoni väljundvõimsus on väga väike, võimendatakse seda enne moduleerimist vajalikul määral.

Moduleerimisprotsessis rakendatakse signaali võimsust kas kandevlaine amplituudi, sageduse või faasi muutmiseks, millele vastavad kolm moduleerimistehnoloogiat: amplituud-, sagedus ja faasmodulatsioon.

## Amplituudmodulatsioon

Õige amplituudmodulatsiooni oluliseks eelduseks on moduleerimata kandevlaine amplituudi täielik ühtlus. Moduleeritud kujul peab kandevlaine aga säilitama oma põhisageduse. Soovimatuid kandevlaine amplituudi



muutused avalduvad vastuvõtjas nn. võrgumürana, kuna nad sisaldavad endas filtreerimata jäänud võrguvoolu vahelduvat komponenti. Samuti ei tohi esineda kandevlaine algsageduse muutmist ehk triivimist, mis kutsub esile lisaks amplituudmodulatsioonile ka sagedusmodulatsiooni. Säärane sagedusmodulatsioon põhjustab ruumis saatelainete vastastikuseid häireid ning avaldub amplituudmodulatsiooni kasutatavas vastuvõtjas tugeva moonutusena. Amplituudmoduleeritud üheastmelises saatjas on sagedusmodulatsioon vältimatu kuna antud protsess ise peab toimuma saatja ostsillaatori osas. Moduleerimisprotsessi vältel muutuvad moduleeritava astme võnkeringi parameetrid, mis määravad resonantssageduse niikaua, kuni moduleeritavasse astmesse juhitava ergutusvõimsuse sagedust ei stabiliseerita väljaspool. Seepärast eraldatakse saatjas konstantse kandevlaine sageduse genereerimine ja moduleerimine teineteisest. Esimene neist pannakse ostsillaatorile, teine moduleeritud võimendajale. Et vältida moduleeritud astme mõju ostsillaatorile, pannakse nende vahele üks, tavaliselt aga mitu võimendusastet, mis toimivad kas põhisageduse võimendajana või sageduskordistina.

Modulatsiooni iseloomustamiseks kasutatakse modulatsioonitegurit, mis näitab kandevlaine

$$m = \frac{Y + Z}{2X} 100$$

amplituudi muutumise ulatust protsentides: , kus Z on amplituudi langus, Y amplituudi kasv ja X kandevlaine amplituud. Sümmeetrilise moduleerimise puhul, kus Y=Z

$$m = \frac{Y}{X} 100$$

on valem kujul

Sümmeetrilise moduleerimise korral võib modulatsioonitegur m tõusta maksimaalselt 100-ni. Kuna vastuvõtja väljundpinge ühtlase kandevlaine juures on võrdeline modulatsiooniteguriga, siis kandevlaine kasutamise seisukohalt on saatjas soovitav kandevlaine moduleerida maksimaalselt. Arvutus näitab, et 100-protsendiliselt moduleeritud 25-vatise võimsusega kandevlaine on oma töövõimelt võrdne 50-protsendiliselt moduleeritud 100-vatise võimsusega kandevlaine. Viimane kehtib juhul, kui vastuvõtjas kasutatakse lineaarset detektorit. Teisel astmel töötava kvadraatse detektorit juures on võimsam kandevlaine efektiivsem. Samal ajal tekitab see aga asjatult suuremaid häireid ruumis liikudes.

Moduleeritud kandevlaine võrrandi lähem vaatlus näitab, et moduleeritud laine amplituud omab maksimaalset väärtust, kui  $\sin 2\pi F = +1$  ja minimaalset väärtust, kui  $\sin 2\pi F = -1$ . Täieliku moduleerimise korral muutub kandevlaine vooluamplituud  $I_k$  tsükliliselt  $2I_k$  ja nulli vahel. See kehtib ka pingeamplituudi kohta. Järelikult ulatub kandevlaine võimsus modulatsiooni tippudel kuni neljakordse moduleerimata võimsuseni, lähenedes amplituudi negatiivses osas nullile.

Paralleelselt eeltooduga vaadatakse moduleerimist kui ebalineaarset protsessi, milles kandevlaine sagedus  $f$  tekitab moduleerimissagedusega  $F$  segunedes kaks uut sagedust, mis on võrdsed mõlema sageduse summaga  $f + F$  ja  $f - F$ . Neid uusi sagedusi nimetatakse ülemiseks ja alumiseks külgsageduseks.

Komplekslainet võib alati vaadelda nii amplituudi muutumise järgi aja suhtes kui ka sagedusspektri järgi, s.t. erisuguste siinuselist komponentide järgi, millest laine koosneb. Üleminek sagedusspektrist vastavasse amplituudskaalasse on lihtne, kuna sagedusspektri eri komponendid peavad liituma ja andma komplekslaine ajalisel muutuva kõvera. Vastupidine tegevus on keerulisem, kuid lahendatav Fourier' analüüsiga. Viimase lähtub faktist, et siinuselise laine ruut omab igal ajahetkel alati positiivset keskväärtust, kuid erinevate sagedustega siinuslainete korrutis annab õigesti valitud ajavahemiku korral nullise hetkväärtuse.

Võimsuse jaotumise seisukohalt jääb moduleerimise kestel kandevasageduse võimsus endiseks, kuid protsessi käigus lisanduv võimsus suunatakse külgsagedustesse. Sümmeetrilise saajaprotsendilise moduleerimise puhul on külgsagedustesse paigutatud võimsus võrdne poolega (s.t. mõlema puhul eraldi veerandiga) kandevasageduse võimsusest. Tegelikult ei toimu moduleerimine üheainsa moduleeriva sagedusega, vaid terve muutuva sageduse spektriga. Seepärast liituvad kandevasagedusega moduleeritavatele sagedustele vastavad külgsagedusribad, mis akustiliste saadete puhul ulatuvad madalamatest kõrgeimate helisagedusteni. Vastavalt sellele moduleeritud kandevasagedus haarab oma külgsagedusribadega tervet sageduskanalit, mille laius võrdub mõlema külgsagedusriba kõrgeimate sageduste summaga. Kui kõrgeimaks sageduseks on 4500 Hz, siis sageduskanali laius kujuneb 9,0 kHz, moduleerides kõrgeima sagedusega 15 000 Hz, kujuneb sageduskanali laiuseks 30 kHz. Sageduskanali laiuse piirab ruumi nappus, mida on vaja suure arvu saatjate häirevabaks töölepanemiseks. Samas tingib aga kõrgekvaliteediline heliülekanne laia sagedusriba kasutamist.

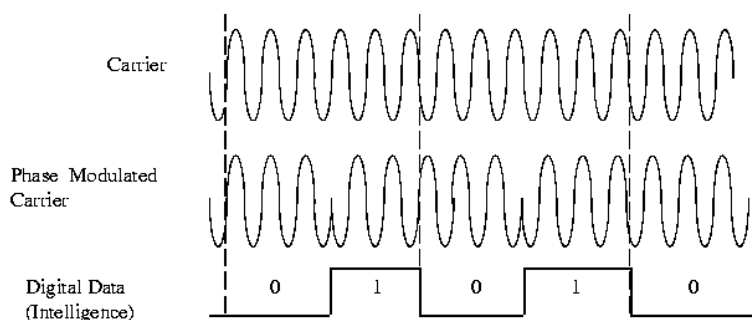
## Faasmodulatsioon

Lisaks amplituudi moduleerimisele on võimalik muuta ka kandevlaine faasi ja sagedust.

Amplituudmodulatsioonil on faas- ja sagedusmodulatsioon kahjulik nähtus, sest nendega koos tekivad amplituudi demoduleerimise käigus signaali moonutused. Sagedusmodulatsiooni nähtus tekib amplituudmoduleerimise

korral neis saatjais, milledes ei ole kandevasagedus piisavalt hästi stabiliseeritud. Faasmodulatsioon tekib, kui vastuvõtjasse satuvad antenni kaudu üheaegselt nii otselaine kui faasis nihutatud ruumilaine. Ka sellisel juhul tekivad vastuvõtjas tõsised häired. Kui aga faas- või sagedusmoduleerimine teostada saatjas, ja vastav demodulatsioon vastuvõtjas, kujuneb saade häiretuks.

Faasmodulatsiooni korral muutub kõrgsagedusvõnkumiste (kandevasageduse voolu ja pinge) faas modulatsioonisageduse rütmis. Seejuures tekkivat maksimaalset faasinihkenurka nimetatakse faasideviatsiooniks. Tsüklilise omadusega faasimuutmine kutsub esile kandevlaine sageduse muutumise täpselt samamoodi nagu amplituudmodulatsiooni juures põhjustas amplituudi muutumine kandevlaine sageduse muutumise. Matemaatiline analüüs näitab, et faasmoduleerimisel tekib lõpmatul arvul külgsagedusi, mis asetsevad kandevasageduse suhtes sümmeetriliselt ning mille amplituudi väärtused on sõltuvuses

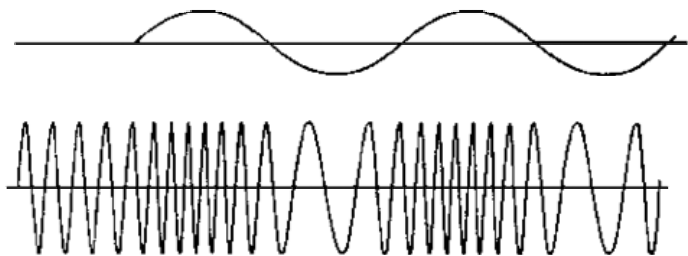


faasideviatsioonist. Moduleerimisel jääb kandevlaine amplituud madala modulatsiooniteguri puhul praktiliselt konstantseks. Faasmodulatsiooni korral tuleb amplituudmoduleeritud kandevasagedus liita teise samasageduselise, kuid 90-kraadise faasinihkega moduleerimata võnkumisega.

## Sagedusmodulatsioon

Radiotehnika arengus on sidekvaliteedi parandamisel olnud määrava tähtsusega müradest vabanemine ja helidünaamika säilitamine esialgsel kujul. Mõlemad on seotud amplituudmodulatsiooni piiratusega. Nimelt suureneb moduleerimissageduste riba laienemisega ka moduleeritud kanali laius ja koos sellega vastavalt ka mürade tase ülekandetraktis. Teatavasti tekivad mürad saatjas ja vastuvõtjas endis elektronide ebaühtlase liikumiskiiruse tõttu võnke- ja voluringides ning mitmesugustes lülitustes. See avaldub eriti teravalt suurte tundlikkuste korral. Märgatavalt suuremaid häireid põhjustavad vastuvõtjas peale viimaste hoopis tööstuslikud ja atmosfäärilised mürad ja naaberkanalitel töötavad raadiosaatjad, millest pole vaba ükski saade. Kõik raadiohäired ja -mürad omavad pigem amplituudilist iseloomu ja suurenevad ülekantava riba laiuse kasvades.

Peale selle panevad mürad ja häired piiri ka helidünaamikale. Nimelt saab akustiline ülekanne olla täiuslik vaid siis, kui esialgsed helitugevused kõigi oma



peensustega jõuavad muutumatul kujul vastuvõtja valjuhääldisse. Teatavasti ulatub orkestri poolt kontserdisaalis tekitatavate kõige tugevamate ja kõige nõrgemate helitugevuste suhe kuni kümne miljonini (70 dB), mis nõuaks samas vahekorras saatja kandevlaine moduleerimist. Kuna aga saatja omamürad ületaksid helitugevuse originaalsuhte säilitamisel märgatavalt nõrgemad helikujundid, ollakse sunnitud saatjas helidünaamilist spektrit kärpima, mis vähendab ülekande loomulikkust.

Seega suurendab helikvaliteedi tõstmine amplituudmoduleerimise tehnoloogiat kasutades ka mürasid ja häireid, mis paneb piiri ülekande täiuslikkusele.

Võrreldes amplituudmodulatsiooniga on sagedusmodulatsioon nendest puudustest vabam. Nimelt säilitatakse sagedusmodulatsiooni juures saatelaine amplituud konstantsena, kusjuures muudetakse vaid kandevlaine sagedust modulatsiooni signaali rütmis (vt. juuresolev joonis). Kui võrrelda sagedusmodulatsiooni ja amplituudmodulatsiooni füüsikalist külge, siis avaldub moduleerimissignaali tugevuse muutumine sagedusmoduleeritud kandevlaine sageduse muutumise vahemikuna, mis amplituudmodulatsiooni juures vastab kandevlaine amplituudi väärtuse muutmisele ajas. Samuti avaldub moduleerimissignaali sagedus sagedusmoduleeritud laine sageduse muutumise kiirusega, mis amplituudmodulatsiooni juures vastab amplituudi muutumise kiirusele.

Kui võrrelda sagedusmodulatsiooni ja amplituudmodulatsiooni graafikut, selgub, et nad on teineteisele sarnased. See on seletatav faktiga, et kandevlaine sageduse tõstmisega tehtud kindla suuruse võrra kaasneb pidevalt arenev faasi ettejäudmine, mis kestab senikaua, kuni jätkub sageduse tõus.

Kuigi sagedusmoduleeritud laine sisaldab ühtlasi ka faasmodulatsiooni ja vastupidi, ei tule sellest siiski aru saada nii, et sagedusmoduleeritud laine iseenesest ongi juba faasmoduleeritud laine või vastupidi. Vaadates moduleeritud lainet, selgub, et see kujutab moduleerimissignaali moonutatamatult moduleeritud sagedusmoduleeritud lainet ning samal ajal tõsiste moonutustega sama moduleerimissignaali faasmoduleeritud lainet.

Sageduse muutumise maksimaalset ulatust ühes suunas (kandevasageduse maksimaalset suurenemist ja vähenemist) nimetatakse sagedusmodulatsiooni juures sagedusdeviatsiooniks ja väljendatakse tavaliselt kilohertsides. Seega kandevasageduse  $f$  muutumisele suurenemise ja vähenemise suunas maksimaalselt  $f_{min}$  kuni  $f_{max}$  vastab sagedusdeviatsioon  $\Delta f = f_{max} - f$  ja  $\Delta f = f - f_{min}$ . Sümmeetrilisel moduleerimisel on need mõlemad võrdsed.

Sagedusmodulatsiooni juures ei esine modulatsiooniteguri mõistet, sest sagedusdeviatsioon ei ole piiratud. Amplituudmodulatsiooni juures oli moduleerimise ülempiir 100%. Sagedusmoduleerimise maksimaalne teoreetiline piir saavutatakse siis, kui sagedusdeviatsioon saab võrdseks kandevasagedusega, s.t. kui kandevasagedus muutub maksimaalse modulatsiooni hetkedel nullise sagedusega vooluks (alalisvooluks), mis tegelikult ei ole võimalik. Sagedusdeviatsiooni piirid on pigem praktilist laadi. Ühelt poolt on selleks kasutamiseks antud sagedusriba laius, mille võtab enda alla kandevasaine koos külgribadega, teisalt aga ka saatja sagedusdeviatsiooniline töövõime, mis oleneb juba konkreetsest saatja lülitusest.

Sagedusmoduleerimisel kandevaslainesse lisavõimsust ei paigutata (nagu amplituudmoduleerimiselgi), mistõttu sagedusmoduleeritud laine amplituud jääb konstantseks. Seega avaneb lihtne võimalus peaaegu täielikult vabaneda amplituudilistest müradest. Seda juhul, kui enne detekteerimist maha lõigata amplituudmoduleeritud tipud, mis laine levikul saatjast vastuvõtjani ja vastuvõtja eelvõimendajas lainega liitusid.

Kuna moduleerimissignaali amplituudide ülekandesuhe on sagedusmoduleerimisel praktiliselt piiramata ja mürade mahasurumine küllalt täiuslik, pole sagedusmodulatsioonitehnoloogia rakendamisel raksusi ka helidünaamika algkujul säilitamisega.

Samuti nagu amplituud- ja faasmodulatsioonil, tekib ka sagedusmoduleerimisel põhisageduse ümber külgribade spekter. Seejuures muutuvad spektri sagedused koos moduleerimissagedusega. Lisaks harilikule põhisageduse ja modulatsioonisageduse summale ja vahele tekivad sagedusmoduleerimisel külgsagedused veel modulatsioonisageduste harmooniliste sageduste vahena ja summana. Säärane olukord on tingitud õige faaside suhte säilitamise vajadusest kandevasageduse ja külgribade vahel, mis tagab püsiva väljundvõimsuse. Selle tulemusena on aga sagedusmoduleeritud laine märgatavalt laiem kui amplituudmoduleerimist kasutades.

Sagedusmoduleeritud laine sageduskanali laiust määratakse modulatsiooniindeksiga  $m_f$ , mis kujutab endas maksimaalse sagedusdeviatsiooni suhet modulatsioonisageduse  $F$ :

$$m_f = \frac{\Delta f}{F}$$

Seejuures mõeldakse modulatsioonisageduse all kõrgeimat modulatsioonisagedust. Kui näiteks sagedusdeviatsioon on 75 kHz ja kõrgeim modulatsioonisagedus 15 kHz, siis on modulatsiooniindeks võrdne viiega. Külgsageduste arv üksiku modulatsioonisageduse juures tõuseb sagedusdeviatsiooniga. Kui modulatsiooniindeks ulatub viieni, muutuvad külgsagedused väljaspool sagedusdeviatsiooni nii nõrkadeks, et sageduskanali laiuseks võib praktiliselt võtta kahekordse sagedusdeviatsiooni väärtuse, vaadeldaval juhul 150 kHz.

Sagedusmoduleerimisel on olulisim tingimus võrdelisuse ehk lineaarsuse säilitamine sageduse deviatsiooni ja moduleeritava signaali amplituudi vahel. Samuti pole vähemoluline kandevasaine amplituudi konstantsus moduleerimisel. Viimane tingimus seab saatja võnkeringidele ja antennile nõude, et nende häälestusteravus oleks küllalt lame, et tagada töö võimalikult laia sagedusspektri ulatuses, kuna vastasel korral tekivad ülekantavas modulatsioonisageduste ribas lineaarMoonutused. Sama nõue kehtib ka vastuvõtja kohta.

Võrreldes amplituudmodulatsiooniga on sagedusmodulatsioon mitmes aspektis parem. Kõige olulisem positiivne külg on mürade vähenemine vastuvõtjas. Kõik elektrilised mürad, olenemata nende päritolust, kujutavad endast enamikus amplituudmoduleeritud elektrivõnkumist. Sattudes koos soovitud võnkumistega amplituudi demoduleerimist kasutavasse vastuvõtjasse, põhjustavad nad selles märgatavaid häireid. Kui vastuvõtjas kasutada säärast demodulatsiooni, mis ei reageeri amplituudi muutumistele, vabaneb vastuvõtt müradest; viimased võivad tekkida ainult siis, kui nad põhjustavad säärase faasinihke, mis avaldub vastuvõetavas signaalis sagedusmodulatsioonina. Võrdse kandevasaine võimsuse juures paraneb võrreldes amplituudmodulatsiooniga signaal-müra suhe vähemalt 100 korda (20 dB). Vastuvõtt on praktiliselt müra- ja kahinavaba isegi rasketes müratingimustes, mis annab võimaluse säilitada helidünaamikat algkujul.

Peale selle ei muutu moduleerimise käigus kandevasaine võimsus, järelikult ei kasutata moduleerimiseks võimsust. Sagedusmoduleerimine toimub saatja esimestes astmetes, kus võimsused on üsnagi väikesed. Moduleerimisastmele järgnevad sageduskordistus- ja võimuse võimendusastmed. See annab suure kasuteguri ja vabastab ühtlasi kriitiliste ergutusvõimsuste, eelpingete modulaatorites.

Lisaks eelnevale on sagedusmodulatsiooni positiivseks küljeks tõsiasi, et vaatamata sellele, et sagedusmodulatsiooni puhul kasutatakse laiemat sagedusriba, ei teki naaberkanalitel ja isegi ühistel kanalitel töötavatelt saatjatelt vastastikuseid häireid vastuvõtjas niikaua, kuni

saatelainete väljatugevused pole üksteisega peaaegu võrdsed. Kui saatjate väljatugevused suhtuvad üksteisesse kuni 2:1, võtab tugevam signaal vastuvõtjas kontrolli endale ning teiste saatjate signaale ei ole kuulda.

## Pulssmodulatsioon

Pulssmoduleerimisel saadab saatja välja tsükliliselt väga lühikesi, kuni mikrosekunditesse ulatuvaid üksikuid impulsse. Põhimõtteliselt võib pulsspõhimõttel töötavad seadmed jagada kaheks. Esimesed on seadmed, milles saatja poolt väljasaadetud pulsside kombinatsiooni kasutatakse eemalasuvais vastuvõtupunktides heli-pildi jms. taasesituseks. Teisel juhul kasutatakse väljasaadetud impulsse vastuvõtjas koos kolmandatelt esemetelt tagasipeegeldunud impulssidega nende esemete asukoha või kauguse määramiseks. Sel juhul on vastuvõtja harilikult saatja läheduses. Pulssmodulatsioon ei kujuta sarnaselt aegmodulatsioonile iseenesest omaette

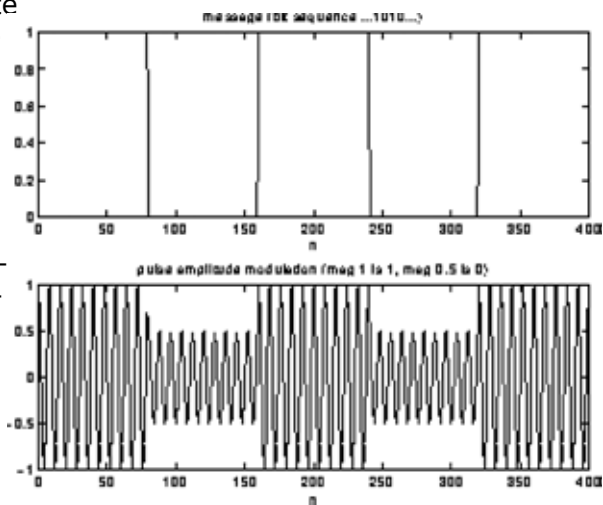
modulatsioonimeetodit vaid teiste põhimeetodite tehnilist rakendamist impulsside väljasaatmiseks. Järelikult impulsside väljasaatmist saatjast teostada kas amplituud- faas- või sagedusmoduleerimist kasutades.

Vastavalt sellele eristatakse pulss-amplituudmodulatsiooni, pulss-faasmodulatsiooni ja pulss-sagedusmodulatsiooni. Esimene neist kujutatud järgmisel lehel oleval joonisel. Seejuures pulssmoduleerimist võidakse teostada kahel erineval viisil: saadetakse välja rida kindlas järjestuses üksteisele järgnevaid terviklikke vooluimpulsse või saadetakse välja selliste vooluimpulssidena kandevlaine vastavad lõigud laineimpulssidena.

Pulssmodulatsioonil võidakse saatmiseks kasutada niihästi terviklikke vooluimpulsse kui ka laineimpulsse. Viimasel juhul saavutatakse pulssmoduleerimine kas moduleeritud impulsside kasutamisega moduleeritud pulsside asemel kandevlaine moduleerimiseks või ühtlaste laineimpulsside moduleerimisega.

Igal pulssmoduleerimise viisil on omad tehnilised omadused, milledele vastavalt nad ka rakendamist leiavad. Nii näiteks kasutatakse pulss-faasmodulatsiooni neil juhtudel, kui on tarvis eraldada impulsse üksteisest väikeste faasinihete järgi (sest faasideviatsioon saad ulatuda maksimaalselt kuni ühe täisringini). Pulss-sagedusmodulatsiooni kasutatakse juhul, kui on tegemist suuremate sageduslike erinevustega ja pulss-amplituudmodulatsiooni siis, kui on vaja kasutada ühte saatelainet mitme kanaliga saateks. Peale selle võimaldab pulssmodulatsioon teostada salajast ühendusepidamist, kuna temas liituvad paljud muutlikud tegurid, mida on võimalik pidevalt varieerida.

Olenevalt ülekantava signaali keerukusest võivad mitmed impulsid teatavas järjekorras vahelduda. See tagab saadetava signaali korrektse dekodeerimise vastuvõtjas. Kuna nii saatjas kui ka vastuvõtjas on vajalik impulsside täpse kuju, amplituudide väärtuse ja faasilise suhte säilitamine, on vastavatele seadmete esitatud ranged nõudmised.



võib

on

kas