

QAM-MODEEMIN TOIMINTA

QAM-modulaatio on nykyisin eniten käytetty modulaatiotapa kantoaalto-modee-meissa. QAM (Quadrature Amplitude Modulation) tarkoittaa modulaatiotapaa, jossa kantoaallon vaihetta ja amplitudia voidaan vaihtaa toisistaan riippumatta. Kyseessä on siis kaksidimensioiden modulaatio, joka soveltuu digitaalisen informaation siirtoon.

QAM-modulaatioon perustuvat nopeat puhelinverkon datamodeemit, kuten valinta-verkon V.22 bis (2400 bit/s) ja V.32 (9600 bit/s) ja kiinteän verkon V.29 (9600 bit/s) ja V.33 (14400 bit/s).

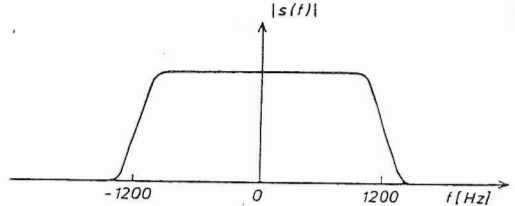
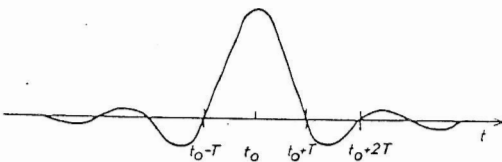
Vaihemodulaatio (PSK) voidaan käsitellä QAM:n erikoistapaukseksi, jossa amplitudi on vakio. Eräät vanhemmat datamodeemit käyttävät PSK:ta, kuten valinta-verkon V.22 (1200 bit/s) ja kiinteän verkon V.27 (4800 bit/s).

Artikkelin tarkoituksena on lyhyesti esittää QAM-modulaation teoriaa sekä QAM-modeemin eri osien toiminta.

PAM-modulointi

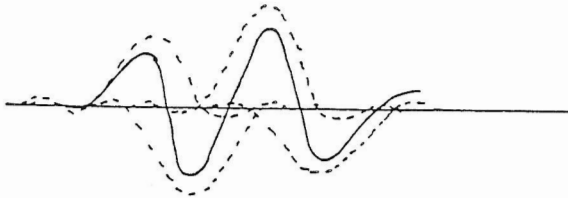
Tarkastellaan ensin erikoistapauksena reaalista PAM-modulointia (Pulse Amplitude Modulation).

Lähetin lähettää yhden pulssin jokaista symbolia kohden. Pulssiin sisällytetään tieto lähetettävästä symbolista siten, että sen amplitudi valitaan lähetettävän symbolin mukaan. Lähetettävän pulssin muoto valitaan siten, että se spektrinsä puolesta läpäisee siirtokanavan mahdollisimman hyvin.

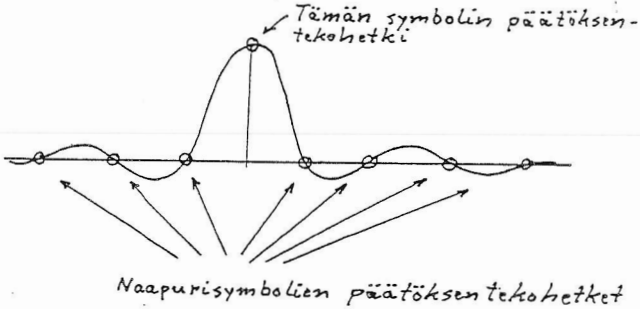


Lähettimen pulssi ja sen spektri.

Lähetettävä signaali koostuu siis peräkkäisistä pulsseista, jotka voivat olla osittain päällekkäin:



Päätöksenteko vastaanottimessa tapahtuu siten, että pulssijonosta otetaan näytteitä symbolin välein. Jotta naapurisymbolit eivät häiritse päätöksentekoa, olisi niiden oltava nolliä päätöksentekohetkellä. Tämä toteutuu, jos koko systeemin (kanava + suodattimet) läpi mennyt pulssi on seuraavanlainen:

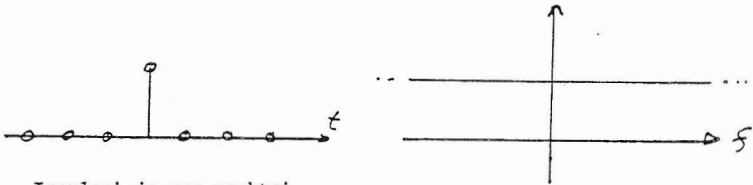


Keskinäisvaikutukseton pulssi

Jos keskinäisvaikutus (intersymbol interference, ISI) on nolla, täyttää pulssi ns. Nyqvistin 2. ehdon. Taajuustasossa esitettyä sama ehto saa muodon:

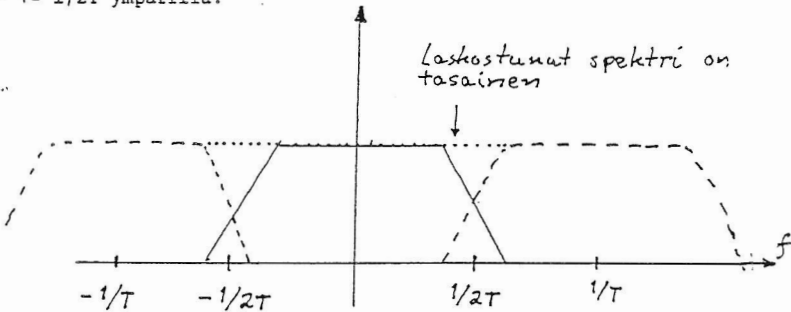
Symbolin välein samplattun pulssin spektrin on oltava vakio

Tämä on helppo ymmärtää, sillä jos $ISI=0$, koostuu symbolin välein samplattu pulssi yhdestä ainoasta impulssista, jonka spektri on vakio:



Impulssi ja sen spektri

Samplattaessa pulssia symbolin välein alkuperäinen spektri laskostuu taajuuksien $f = \pm 1/2T$ ympärillä.



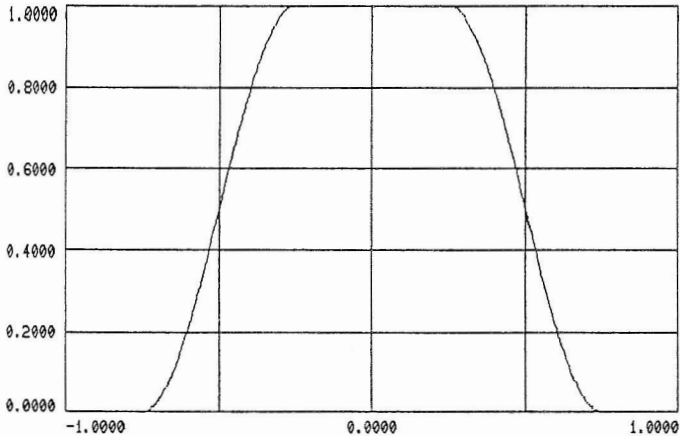
Symbolitaajuudella $f_s = 1/T$ samplattun Nyqvist-kriteerin täyttävän signaalin spektri

On huomattava, että Nyquist ehdon täyttäviä spektrejä on äärettömän paljon. Yleisesti käytetään nostetun kosinin spektrimuotoja. Nämä saadaan kaavasta:

$$G(f) = \begin{cases} A & , \text{ kun } |f| < (1-a) f_s / 2 \\ A/2 (1 + \cos((f - (1-a) f_s / 2) / (f_s - a))) & , \text{ kun } (1-a) f_s / 2 < |f| < (1+a) f_s / 2 \\ 0 & , \text{ kun } |f| > (1+a) f_s / 2 \end{cases}$$

Kaavassa f = symbolitaajuus
 A^s = spektrin maksimiarvo (saadaan nolldataajuudella)
 a = kosinisppektrin muotokerroin, voi saada arvoja $0 < a < 1$

Kuvassa on nostetun kosinisppektrin muoto, kun $a = 50\% (=0.5)$.

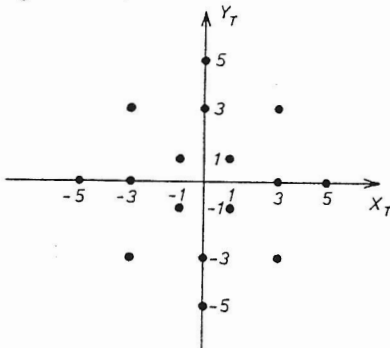


Nostettu kosinisppektri

QAM-modulointi

QAM-modulointi on muuten sama kuin PAM-modulointi, mutta nyt lähetysspulssi kerrotaan kompleksisilla kertoimilla. QAM-modulaatiossa lähetettävä symboli on siis kompleksinen. Nämä kompleksiset kertoimet saadaan, kun symboleja vastaavat amplitudi- ja vaihekombinaatiot piirretään X-Y-koordinaatistoon.

Kuvassa on V.29 modeemin signaalipisteet piirretty kompleksitasoon. Eri symboleja on 16 kappaletta, joten yksi symboli siirtää tietoa neljän bitin verran. Kun V.29 modeemin symbolinopeus (baudinopeus) on 2400 baud ja kussakin symbolissa siirtyy neljä bittiä, saadaan modeemin bittinopeudeksi 9600 bit/s.



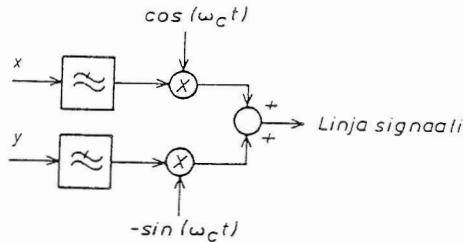
QAM-moduloinnissa saadaan siis ensin aikaiseksi kantataajuinen kompleksinen signaali. Sitä ei kuitenkaan voi sellaisenaan siirtää reaalisessa kanavassa. Jos kantataajuinen signaali kerrotaan kompleksisella kosiniaallolla

$$\begin{aligned} & \cos(2\pi f_0 t) + j \sin(2\pi f_0 t) \\ & = e^{j2\pi f_0 t} \end{aligned}$$

siirtyy sen spektri taajuuden f_0 verran oikealle.

Jos moduloiva taajuus f_0 on suurempi puolet QAM-signaalin spektrin leveydestä, siirtyy koko spektri positiivisille taajuuksille. Tästä signaalista saadaan reaalin ottamalla siitä vain reaaliosa. Eli reaalin QAM-signaali saadaan:

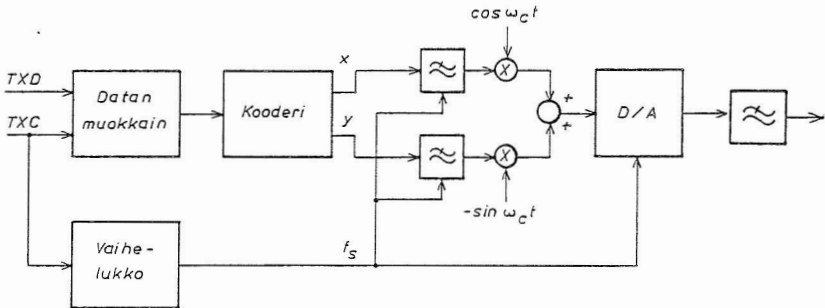
$$\begin{aligned} r(t) &= \text{Re} (s(t) e^{j2\pi f_0 t}) \\ &= s_R(t) \cos(2\pi f_0 t) - s_I(t) \sin(2\pi f_0 t) \end{aligned}$$



QAM-modulaattori

QAM-modulaattorin lähettämä pulssimuoto määräytyy alipäästösuodattimissa, joiden tuloon syötetään lähetettävän symbolin koordinaatteja vastaava impulssi. Alipäästösuodatin toteutetaan yleensä digitaalisena FIR-suodattimena, jolloin pulssimuoto on tarkasti määrättävissä FIR:in pituuden rajoissa.

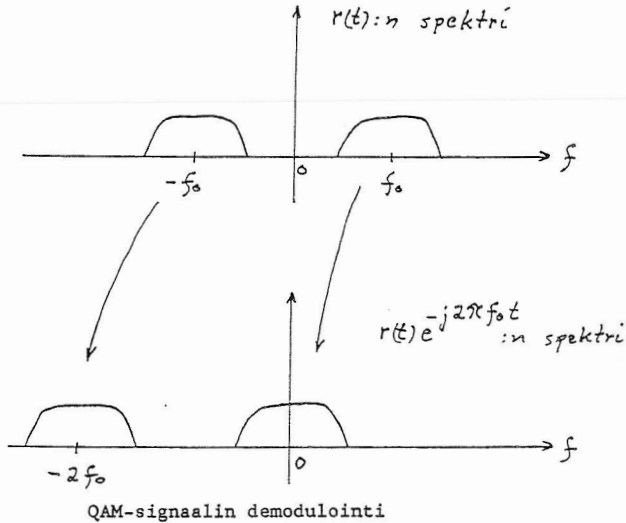
Lähetettävän spektrin tasaamiseksi koko siirtokaistalla, varustetaan QAM-mo-deemi yleensä datan muokkaimella (scrambler). Digitaalinen signaali muutetaan analogiseksi moduloinnin jälkeen. Signaali on D/A-muuntimella diskreettiaikaista. Se saadaan jatkuvaksi analogisella alipäästösuodattimella. Nyt onkin koko lähettimen lohkokaavio piirrettävissä:



QAM-modulaattorin lohkokaavio

QAM-vastaanotin

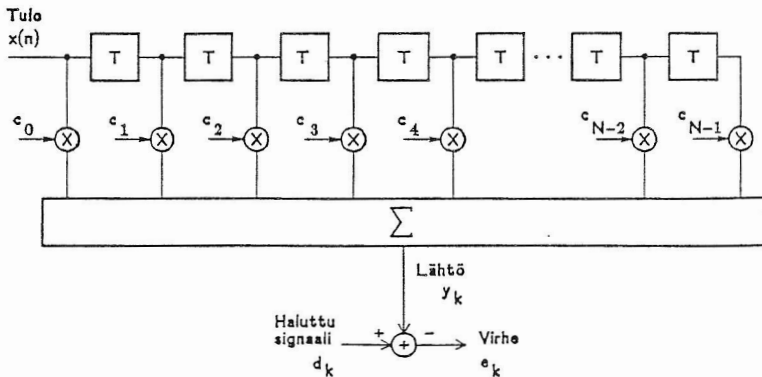
QAM-vastaanotuksessa vastaanotettava signaali muutetaan takaisin alkuperäiseen kompleksiseen muotoonsa kertomalla signaali $e^{-j2\pi f_0 t}$:lla, jolloin sen spektri siirtyy f_0 :n verran vasemmalle.



Kun suodatetaan $-2f_0$:n ympärille siirtynyt spektri pois, saadaan aikaiseksi kantataajuinen kompleksinen signaali, josta ottamalla näytteitä oikea-aikaisesti kerran symbolissa, saadaan selville lähetetyt symbolit.

Käytännössä lähetettävät pulssit eivät enää vastaanottimen päätöksenteossa ole keskinäisvaikutuksettomia, vaan käytettyjen suodatimien ja kanavan epäideaalisuudet aiheuttavat sen, että viereiset symbolit sekä ylikuuluminen reaali- ja imaginääriosien välillä aiheuttavat häiriötä päätöksenteossa.

Symbolien välistä keskinäisvaikutusta voidaan pienentää (ja useinmiten jopa kokonaan poistaa) käyttämällä vastaanotuksessa adaptiivista korjainta. Se toteutetaan yleensä digitaalisena transversaalisuodattimena, jonka tappikertoimia voidaan säätää. Säätö suoritetaan siten, että virheen neliöllinen teho minimoituu. Kuvassa on adaptiivisen transversaalisuodattimen toteutusperiaate.



Adaptiivinen transversaalisuodatin

Jotta suodatinta voitaisiin säätää, tulee tietää säädön tavoite. Modeemissa aluksi lähetetään ennalta sovittu aloitusjakso, jonka perusteella adaptiivista korjainta on helppo säätää oikeaan suuntaan. Datavaiheen aikana, jolloin saatu data on satunnaista, päivitetään korjainta tekemällä päätös saadusta symbolista lähimpään symbolinarvoon. Virhesignaali, jota käytetään korjaimen päivitykseen, saadaan vähentämällä tullut signaali tehdystä päätöksestä. Agaptiivinen korjain pystyy siis mukautumaan kanavalla tapahtuviin muutoksiin myös datan siirtovaiheen aikana.

Korjaimen kertoimien päivityksessä käytetään yleensä LMS-algoritmia. Se on varsin yksinkertainen toteuttaa ja se konvergoi eräissä tilanteissa optimaaliseksi. Tämän LMS-algoritmin mukaisesti uusi tappikertoimen arvo saadaan seuraavasti:

$c_{i,j,k+1}$ = $c_{i,j,k}$ on i:nen tappikertoimen uusi arvo
 $c_{i,j,k}$ on i:nen tappikertoimen vanha arvo
 u_i on askelvakio
 e on virhe päätöksenteossa
 $x_{i,k}$ on signaalin arvo viivelinjan muistipaikassa (päivitettävän tappikertoimen kohdalla)

Käytännössä adaptiivinen korjain pyrkii tekemään käänteisen suodattimen kanavalle. Siis jos kanava esimerkiksi vaimentaa korkeita taajuuksia siirrettävän spektrin alueella, tekee korjain suodattimen joka vahvistaa näitä vaimentuneita taajuuskomponentteja. Vastaavasti adaptiivinen korjain pystyy kompensoimaan kulkuaikeväristymiä tekemällä suodattimen, jonka vaiheominaisuudet ovat käänteiset kanavan ominaisuuksiin verrattuna.

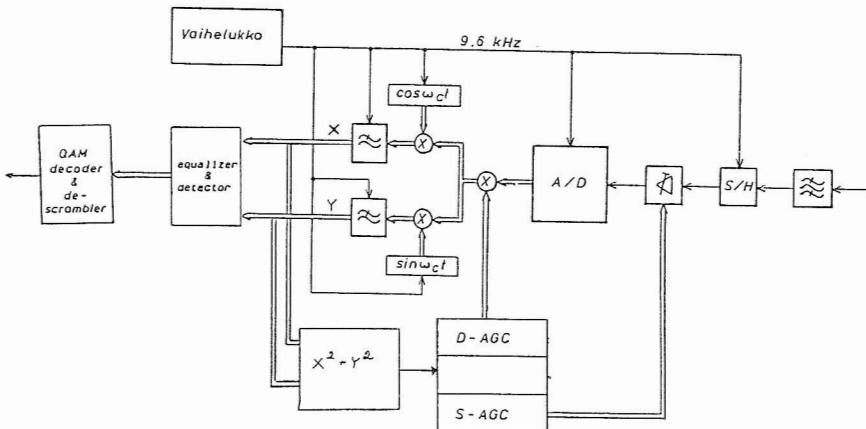
Adaptiivinen korjain tehdään modeemissa yleensä demoduloinnin jälkeen, jolloin signaali on kompleksista. Tarvittavan korjaimenkin tulee siis olla kompleksinen.

Vastaanottimen tulee pystyä synkronoitumaan tulevaan symbolitahtiin. Vaikka sekä lähetin että vastaanotin nimellisesti toimivat samalla nopeudella, on vastaanottavan modeemin pystyttävä seuraamaan lähettävän modeemin kiteen tahdissa tapahtuvaa lähetystä.

Muita modeemin vastaanottimessa tarvittavia osia ovat:

- kantoaallonseuraaaja, joka poistaa siirtotiellä syntyneen taajuussiirtymän
- ilmaisain, joka tekee päätöksen vastaanotetusta symbolista
- kooderi, joka purkaa ilmaistun symbolin takaisin biteiksi
- descrambleri, joka muokkaa lähettimen sotkeman datan takaisin

Seuraavassa kuvassa on yksinkertaistettu lohkokaavio QAM-vastaanottimesta.



Signaalin-kohinasuhteellisuus on suurempi kuin edellä esitellyillä. Tämä on yksi bitti symbolissa. Seuraavassa taulukossa on vertailtu eri modeemien S/N arvoja, kun virhetodennäköisyys on 10^{-6} ja kohinan teho on redusoitu 3.1 kHz:n kaistanleveydelle.

Modeemityyppi	S/N	
V.23 1200 bit/s FSK	7.1 dB	'pakettiradiomodeemi'
V.26 2400 bit/s 4-PSK	9.7 dB	
V.27 4800 bit/s 8-PSK	16.7 dB	
V.29 9600 bit/s 16-QAM	21.1 dB	

S/N luvun vertailu on usein tärkeä kriteeri valittaessa modeemia käyttötarkoitukseen, mutta se ei kuitenkaan kerro koko totuutta. Esimerkiksi käytännössä ei V.23 modeemi ole 14 dB parempi kuin V.29 modeemi, sillä V.23 modeemiin ei ole mahdollista tehdä adaptiivista korjainta, joka parantaa V.29 modeemin suorituskykyä huomattavasti.