

FFT-suodattimen kuvausta

03.04.2026

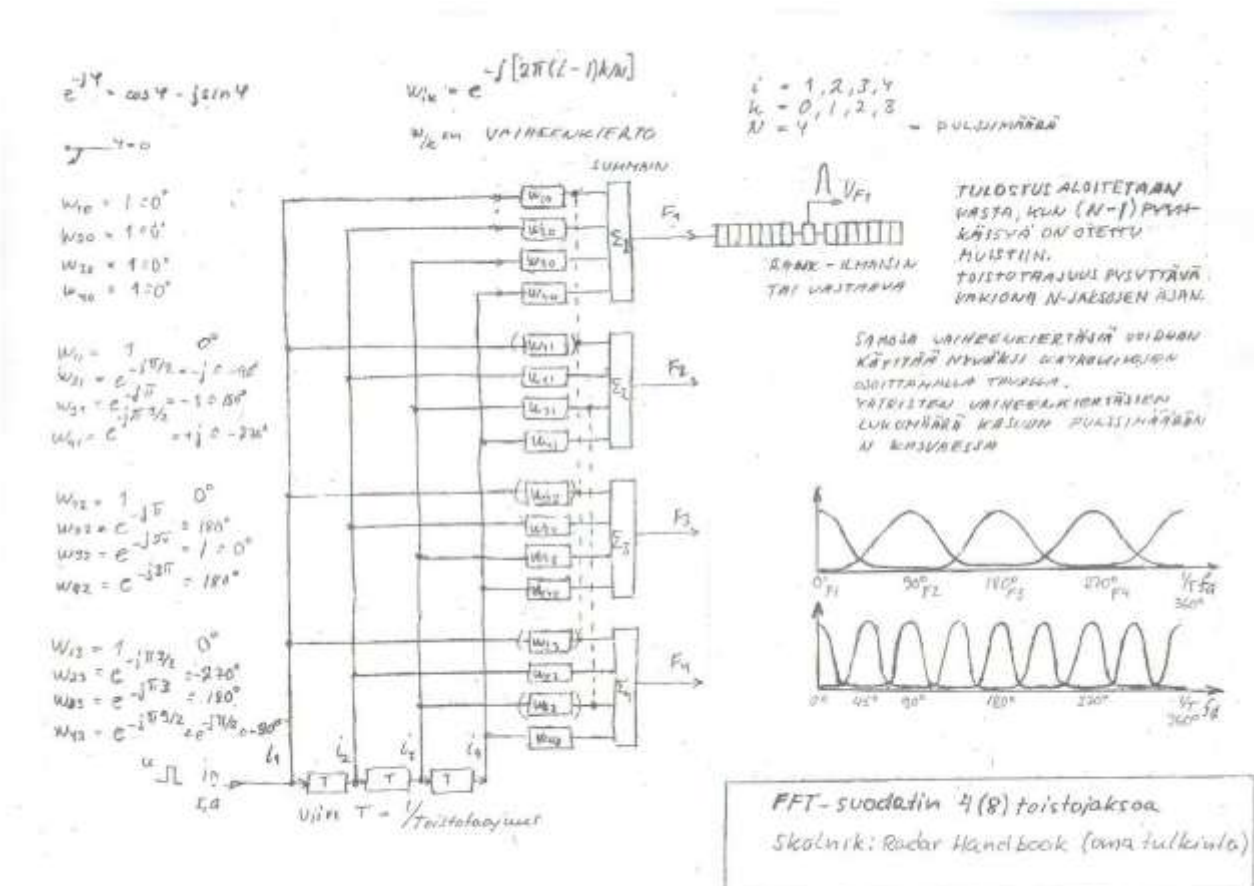
FT-suodatin (Fourier Transform) on nopeussuodatin tuulen liikuttaman sateen ja silpun välkkeen poistamiseksi - mikroprosessorilla toteutettuna FFT-suodatin (Fast Fourier Transform).

(Fast-sana on harhaanjohtava, kun sillä tarkoitetaan vain laskenta-algoritmin "sievennystä" termejä vähentämällä tarkkuuden yhtään kärsimättä.)

Laitoin tähän piirtämäni kuvan kirjassa Merrill Skolnik: Radar Handbook muutamalla sanalla kuvattuna FT-suodattimesta (ei kuvaa). (Vain lyijykynäpiirros valitettavasti.)

Kuvaus on tulkintani esimerkisuodattimen toiminnasta muistiinpanoistani pääteltynä, ja voi poiketa kirjan esityksestä. Minulla ei ole tuota kirjaa, etten voi varmentaa tietoja.

Esimerkki on 4-kanavaisesta FT-suodattimesta, mutta käytössä lienee vain 8-kanavaisia.



Liikkuva sade ja silppu voidaan FT-suodattimella sammuttaa vastaavalla periaatteella kuin MTI sammuttaa kiintomaalit. FT-suodatin jakaa Doppler-alueen tasavälisiin kanaviin toistojakson sisällä, toimien kaistanestosuodattimena. Verrataan liikkuvan sateen tai silpun I/Q-videokaikua peräkkäisten toistojaksojen viivelinjoilla viivästettyihin aikaisempien toistojaksojen kaikuihin. Dopplertaajuus kohteen nopeuden funktiona riippuu tutkan lähetystaajuudesta.

Suodatus perustuu peräkkäisissä toistojaksoissa (pri) = T mitattuun kohteen kaiun aiheuttamaan vaihe-eroon. Liikkuvan kohteen doppler-taajuus f_D aiheuttaa vaihe-eron $\Delta\phi = 2\pi f_D T$.
Kun $\Delta\phi = 2\pi (360^\circ)$, $f_D = 1/T = prf$.

Systeemi ei voi tunnistaa $> 360^\circ$ vaihe-eroa, jolloin vaihe-eron mittaus alkaa uudelleen 0° :sta. $1/T (360^\circ) = 0^\circ$ -kanava, $2/T (720^\circ) = 0^\circ$ -kanava jne. Kaikki kerrannaiset $2/T, 3/T, \dots$ laskostuvat päällekkäin samaan kohtaan.

Kaiun doppler-taajuus toistuu samana toistojaksosta toiseen.

Esimerkki: Toistojakso 3 ms ($prf = 333$ Hz) ja kaiun vaihe-ero on 180° peräkkäisissä toistojaksoissa \rightarrow dopplertaajuus 167 Hz myös toistuu peräkkäisissä toistojaksoissa.

N -kanavainen FFT-suodatin vaatii vähintään N pulssia, $N-1$ viivelinjaa, suodatinmatriisiin $N \times (N-1)$ vaiheenkierittäjää ja N summaajaa. Toistotaajuus pitää pysyä samana ainakin nuo N jaksoa.

Viivästetyt signaalit syötetään FFT-suodatinmatriisiin jakaantuen eri doppler-kanaviin.

Sammutuskaistat syntyvät keskitaajuuksina doppler-taajuudet $f_D = k / NT$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N$.

Peräkkäisten toistojaksojen välillä jokaisella toistojaksolla kaiun vaiheen siirtymä on sama eteenpäin tai taaksepäin, kohteen liikkeen suunnasta riippuen. (Jos tuota siirtoa ei tehtäisi, vain liikkumattoman kohteen viivästetyllä ja suoraan tulevalla kaiulla olisi sama vaihe, vrt MTI).

FFT-4 suodattimen 4-kanavaisessa matriisissa viivästettyjen kaikuja ja suoraan tulleen kaiun vaihe kiertyy neljässä vaihesiirtimessä 90° asteen välein, eli kulmat ovat $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, (FFT-8:ssa kierto 45° asteen välein). Kun jossakin 90° (45°) kerrannaiselle sattuvassa kanavassa peräkkäisten toistojaksojen saman kohteen kaiun vaihe (kierron jälkeen) sattuu samaksi, ne summaajaan (sammuttimeen) syötettynä vastakkais-vaiheisina sammuttavat toisensa riittävän heikoksi. Kun summaajassa on parillinen määrä tuloja, ja signaaleista puolet tulee suoraan ja toinen puoli vaihe käännettynä 180° , sammutus tapahtuu tasapainossa.

90° -kanava-alue ulottuu $0^\circ - 180^\circ$ ja kulmilla $45^\circ - 135^\circ$ vaimennus (sammutus) on yhtä suuri viereisen kanavan kanssa. Kohteen lähestyessä tietyllä nopeudella, mitä lähempänä vaihe-ero viivästetyn ja suoraan tulevan kaiun välillä on 90° , sitä parempi vaimennus saadaan tuossa 90° -kanavassa. Jos kohde loittonee tuolla samalla nopeudella, mitä lähempänä vaihe-ero viivästetyn ja suoraan tulevan kaiun välillä on 270° , sitä parempi vaimennus saadaan 270° -kanavassa.

Esimerkki : Kohteen lähestyessä viivästetyn kaiun ja suoraan tulevan kaiun vaihe-ero on $+80^\circ$.

Kun viivästetyn kaiun vaihetta kierretään eteenpäin 90° , vaihe-eroksi jää -10° , joka hyvin osuu 90° -kanavan sammutuskaistan alueelle. Vastaavasti jos viivästetyn ja suoraan tulevan kaiun vaihe-ero on $+110^\circ$, vaihe-eroksi jää $+20^\circ$, joka sekin osuu 90° -kanavan sammutuskaistan alueelle.

Jos viivästetyn ja suoraan tulevan kaiun vaihe-ero on $+130^\circ$, vaihe-eroksi jää $+40^\circ$, joka sekin osuu vielä 90° -kanavan sammutuskaistalle. Sama kaiku 180° kanavaan – vaihe-eroksi jää -50° astetta, joka vielä juuri osuu 180° -kanavan sammutuskaistalle. Sama kaiku vaimenee siis kahden kanavan alueella, toisella ei täysin, toisella vielä huonommin.

FFT 8-suodattimessa 45° viereisillä kanavilla vastaava tilanteessa sammutus on parempi, kun sammutuskaistat ilmeisen tehokkaina ulottuvat osaksi toistensa alueelle.

Toistotaajuus pitää pysyä vakiona riittävän monen toistojakson N ajan ("burstin" ajan) - riittäneekö 4-kanavan suodattimen 4 toistojaksoa, kun 3 viivelinjaa? Sokeille nopeuksille osuvat kaiut saadaan näkyviin burstin vaihtuessa.

Peräkkäisten toistojaksojen häittamaalien kaikusignaalit nopeutensa perusteella samavaiheisina siis valikoituvat yhteen tai kahteen 4:stä (8:sta) kanavasta (ks kaistanestosuotimen läpäisykäyrä* = "sammutuskäyrä"), jossa ne sammutetaan, mutta samoissa kanavissa lentokonekaiut erivaiheisina eivät sammuu (vrt MTI), vaan ilmaistaan kanavakohtaisissa CFAR-ilmaisimissa. Jos kaksi maalikaikua ilmaistuu, valitaanko vain suurempi jatkoprosessiin, vai summataanko kaiut? Jos ne summataan, S/N suhde heikkenee, koska heikommalla kaiulla S/N on huonompi. Käytännössä suositaan suuremman valintaa.

* Suodattimen läpäisykäyrän lasku- ja nousureunat jyrkkenevät mitä useampi viivästetty toistojakso syötetään summaajaan, jolloin sammutus ja lentokonemaalin ilmaisu paranevat. (Kuvan läpäisykäyrä on vain periaatteellinen, poikkeaa käytännön laitteesta.)

Muissa kanavissa sade- ja silppukaiut erivaiheisina eivät sammuu, mutta kunkin kanavan CFAR ilmaisimien ei niitä liian pitkänä tasalattvaisina kaikuina ilmaise. (Jossakin toisessa nopeuskanavassa lekokaikukin sammuu vaiheesta riippuen, mutta sillä ei ole merkitystä, kun se ilmaistaan sade/silppu sammutuskanavassa).

FFT-8 suodatinta käytettäessä alakulmilla, kiintomaaleja ei epäyhtenäisyyden (epähomogeenisuuden) vuoksi kannata FFT-suodattaa, vaan ne poistetaan MTI-suodattimella. Tästä syystä FFT-suodattimen ala- ja yläpäästä jätetään vastaava alue käyttämättä (alapäässä kohti ja yläpäässä pois päin tapahtuva liike). Suodattimen alin ja ylin kanava jätetään siis käyttämättä, tai koko suodatinkaista siirretään $2\pi/16$ kulman (22,5°) verran ylöspäin, jolloin ala- ja yläpäästä jää yhtä suuret kaistat MTI:n hoidettavaksi.