

**FFT-suodattimen kuvausta**

31.03.2026

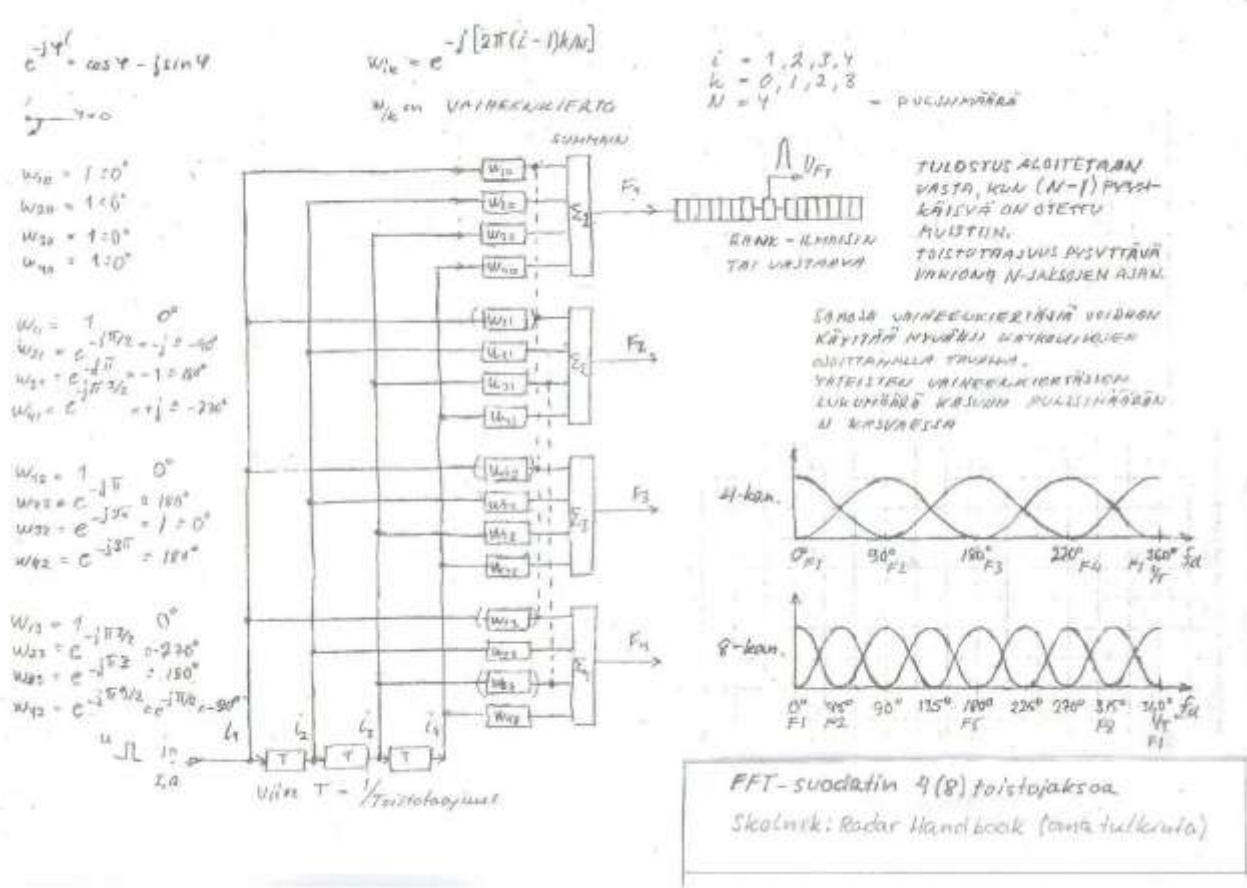
FT-suodatin (Fourier Transform) on nopeussuodatin tuulen liikuttaman sateen ja silpun välkkeen poistamiseksi - mikroprosessorilla toteutettuna FFT-suodatin (Fast Fourierien Transform).

(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 on käsittääkseni 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 kaikua peräkkäisten toistojaksojen viivelinjoilla viivästettyihin aikaisempien toistojaksojen kaikkihiin.

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  $\Delta\phi = 2\pi (360^\circ)$ ,  $f_D = 1/T = \text{prf}$ .

Systeemi ei voi tunnistaa  $> 360^\circ$  vaihe-eroa, jolloin vaihe-eron mittaus alkaa uudelleen  $0^\circ$ :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  $180^\circ$  peräkkäisissä toistojaksoissa -> dopplertaajuus 167 Hz myös toistuu peräkkäisissä toistojaksoissa.

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

Viivästetyt signaalit syötetään FFT-suodatinmatriisiin, jossa ne erotellaan eri doppler-kanaviin. Sammutuskohdat syntyvät doppler-taajuuksille  $f_D = k / NT$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ .

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 kaikujen ja suoraan tulleen kaiun vaiheita kierretään neljässä vaihesiirtimessä  $90^\circ$  asteen välein, eli kulmat ovat  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ , (FFT-8:ssa kierto  $45^\circ$  asteen välein). Jos kohteen lähestyessä suoraan tulevan kaiun ja viivästetyn kaiun vaihe-ero on esim välillä  $+80^\circ - +100^\circ$ , viivästetyn kaiun vaihetta kun kierretään eteenpäin  $90^\circ$ , kaiun vaihe saadaan  $90^\circ$  kierretyn kanavan sammutuskaistan alueelle. Jos kohde etääntyy yhtä suurella nopeudella, nuo kulmat ovat miinusmerkkisiä, ja viivästettyä signaalia kierrettäessä  $270^\circ$ , kaiun vaihe saadaan  $270^\circ$  kierretyn kanavan sammutuskaistan alueelle.

Kun jossakin  $90^\circ (45^\circ)$  kerrannaiselle sattuvassa kanavassa peräkkäisten toistojaksojen saman kohteen kaiun vaihe sattuu samaksi, ne summaajaan (sammuttimeen) syötettynä vastakkaisvaiheisina sammuttavat toisensa riittävän heikoksi. Kun summaajassa on parillinen määrä tuloja, ja signaaleista puolet tulee suoraan ja toinen puoli vaihe käännettynä  $180^\circ$ , sammutus tapahtuu tasapainossa.

Esimerkki: Jos kohde lähestyy tietyllä nopeudella peräkkäisten toistojaksojen vaihe-erolla  $45^\circ - 135^\circ$ , se sammuu  $90^\circ$  asteen kanavassa sitä paremmin, mitä lähempänä vaihe-ero on  $90^\circ$ , mutta jos se loittonee yhtä suurella nopeudella vaihe-erolla  $135^\circ - 315^\circ$ , se sammuu  $270^\circ$  kanavassa vastaavasti.

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 häirtämaalien 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 sammu (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 sammu, mutta kunkin kanavan CFAR ilmaisin ei niitä liian pitkänä tasalatavaisina kaikuina ilmaise. (Jossakin toisessa nopeuskanavassa lekokaikukin sammuu vaiheesta riippuen, mutta sillä ei ole merkitystä, kun se ilmaistaan sade/silppu sammutuskanavassa).

Liikkuvan sateen ja silpun kaikusignaalit keskittyvät Doppler-avaruudessa tiettyihin kanaviin, erityisesti lähelle nollataajuutta. Lentokoneen kaltaiset kohteet jakautuvat muihin kanaviin eivätkä vaimennu samalla tavalla.

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 poispäin tapahtuva liike). Suodattimen alin ja ylin kanava jätetään siis käyttämättä, tai koko suodatinkaista siirretään  $2\pi/16$  kulman ( $22,5^\circ$ ) verran ylöspäin, jolloin ala- ja yläpäästä jää yhtä suuret kaistat MTI:n hoidettavaksi.