Pieni tarina adaptiivisesta signaalinkäsittelystä

Jarkko Vuori OH2LNS
$\aleph_0$ ALEPH NULL
email: Jarkko.Vuori@hut.fi

Mikäli ihmisolennolla on pakottava tarve arvioida kohinaan sekoittunutta signaalia, joko sen olemassaoloa yleensä tai jotain signaalin parametria, voidaan tämä arviointi tehdä suodattimen avulla joka poistaa kohinaa mutta jättää hyötysignaalin melko lailla koskemattomaksi. Tämän tyyppisten suotimien suunnittelu on optimaalisen signaalinkäsittelyn alaa. Mihin sitten tarvitaankaan adaptiivisia suotimia? Ei tarvitse olla Darwin arvatakseen vastauksen: adaptiivinen signaalinkäsitely kykenee mukautumaan muuttuviin ympäristöolosuhteisiin. Tästä on suurta hyötyä mikäli ympäristöolosuhteet muuttuvat voimakkaasti, tai niitä ei suunnitteluvaiheessa edes tunneta. Tässä artikkelissa tarkastellaan hiukan optimaalisia suotimia, näiden adaptiivisia muunnoksia, sekä muutamia adaptiivisten järjestelmien sovellutuskohteita. Lopuksi esitetään käytännön esimerkki adaptiivisen signaalinkäsittelyn hyödyntämisestä puhesignaalin laadun parantamisessa.

Taustaa

Erilaisten havaintojen tulkinta ja ennusteiden tekeminen ovat kiehtoneet uteliasta ihmismieltä jo vuosituhansien ajan. Antiikin babylonialaiset käyttivät eräänlaisia Fourier-sarjojen alkeismuotoja ennustaessaan jaksollisia ilmiöitä. Vuosituhantemme johtavat matemaatikot (mm. Gauss, Legrende) tarkastelivat ennustamisen ongelmia. He pohtivat perustavaa luontoa olevia käsitteitä, ennustusvirheen määritelmää ja havaintomateriaalin määrän vaikutusta ennustamisen luotettavuuteen. Itse ennustajan, algoritmin joka ennusteen tekee, määritteleminen ei vielä tuolloin kovastikaan tiedemiehiä puhutellut.

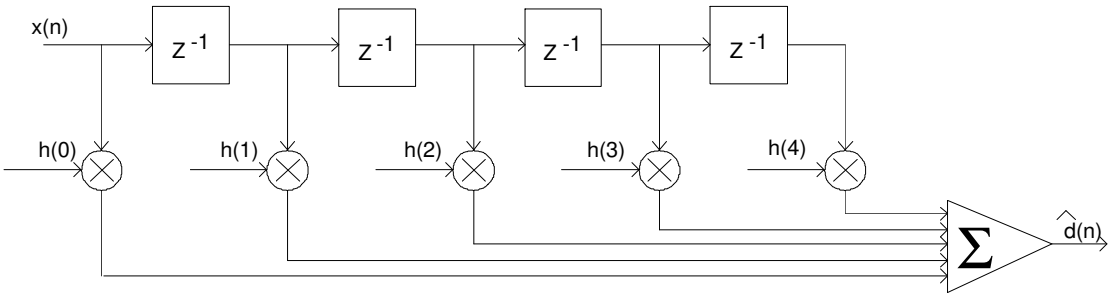
Ennustajan formuloiminen tuli kuitenkin ajankohtaiseksi kun ihmiskuntamme joutui noin puoli vuosisataa sitten yhteen historiansa surulliseen vaiheeseen. 1940-luvun alkupuolella amerikassa oli kyetty toteuttamaan tutka joka pystyi seuraamaan lentokonetta. Nyt syntyi haave saada tämä tutka ohjaamaan ilmatorjuntatykkiä. Koska tykin matkaansa lähettämältä ammukselta kuluu aikansa ennen kun se tavoittaa kohteensa, on tykin suuntauksessa voitava ennustaa lentokoneen liikerata. Tähän tarvitaan ennustaja joka nykyisen ja menneitten tutkahavaintojen pohjalta määrittelee lentokoneen sijainnin tulevaisuudessa halutulla ajanhetkellä.

Tämän ongelman ratkaisun amerikkalainen Norbert Wiener esitti 1942 salaisessa raportissaan. Vuonna 1944 Englannissa oli 300 SCR-584 tutkaa ilmatorjuntatykin ohjauslaitteineen, ja nämä kykenivät tuhoamaan 95% lähetetyistä V1-ohjuksista. Sodan jälkeen 1949 tutkimustyön tulokset julkaistiin kirjassa *Time Series,* joka antoi alkusykäyksen aikasarjojen matemaattisen tarkastelun teorialle.

Koska havainnot ovat yleensä melko kohinaisia, Wiener päätteli että täydellisen universaalin ennustajan toteuttaminen on mahdotonta. Siksipä ennustajan toimintaa tulee tarkastella tilastollisessa mielessä—ei siis tarkastella ennustajan toimintaa eksaktisti, vaan keskimääräisesti. Wiener määritteli ennustamisen ongelmalle statistisen ratkaisun, *Wiener-suotimen*.

Wiener-suodin

Jotta kykenisimme luomaan hyvän ennustajan, meidän täytyy määritellä jokin kriteeri mikä esittää kuinka hyvä kulloinenkin ennustaja on. Ennustajan virhe lienee yksi käyttökelpoinen kriteeri ennustajan hyvyydelle, niinpä hyvyyden kriteerin määritteleminen muuttuu ennustajan virheen määrittelemiseksi. Olkoot *d(n)* signaali jota halutaan ennustaa. Tähän signaaliin on sekoittunut kohinaa *n(n)*, *x(n)=d(n)+n(n)*. Ennustetta tälle signaalille merkitään $\hat{d}(n)$:llä. Aluksi mieleen juolahtaa virheen määritelmäksi ennusteen ja todellisen arvon välinen erotus, $e(n) = d(n) - \hat{d}(n)$. Yleensä kuitenkin positiivinen virhe on yhtä paha kuin negatiivinenkin, joten edellisestä virheestä voitaisiin ottaa itseisarvo jotta positiivinen ja negatiivinen virhe olisivat samanarvoisia. Virheen itseisarvon derivaatta on kuitenkin virheen nollakohdassa määrittelemätön, ja tämä aiheuttaa ikäviä vaikeuksia matemaattisessa analyysissä. Ottamalla virheestä neliö saadaan itseisarvon kaikki edut ja matemaattinen analyysi on helpompaa. Lisäksi virheen neliön voidaan katsovan esittävän virheen tehoa, mikä tuo määritelmään käytännöllistä lumoa. Jotta voitaisiin puhua



Kuva 1: Wiener-suotimen rakenne

keskimääräisestä virheestä, eikä eksaktista virheestä, on meidän lisäksi otettava odotusarvo virheen lausekkeesta. Näin saadan ennustajan *keskimääräinen neliöllinen virhe* määriteltyä

$$e(n) = \mathrm{E}\left\{\left[d(n) - \hat{d}(n)\right]^2\right\}. \tag{1}$$

Koska Wiener-suodin perustaa ennusteensa signaalin menneisyyteen ja nykyarvoon, voidaan suotimen yhtälö esittää muodossa

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) = \mathbf{H}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}, \tag{2}$$

jossa[1]

$$\mathbf{H}^T = \left[h(0),\ldots h(N-1)\right]$$
$$\mathbf{x}^T = \left[x(n),\ldots x(n-N+1)\right] \tag{3}$$

ovat Wiener-suotimen N kerroinkomponenttia ja näytettä. Wiener-suodatin siis muodostaa vanhoista näytteistä painotetun keskiarvon.

Kuvassa 1 on esitetty yhtälön (2) mukainen Wiener-suotimen signaalivuokaavio kun N=5. Valitsemalla suodattimen kertoimet $h(0),\ldots,h(N-1)$ sopivasti saadaan aikaan haluttu ennustaja. Havaitaan myös että Wiener-suodin vastaa rakenteeltaan tavallista äärellisen impulssivasteen (*FIR, Finite Impulse Responce*) suodinta—periaatteessa Wiener-suodin eroaa 'normaalista' suotimesta vain kertoimiensa määrittelytavan osalta.

Tämä Wiener-suotimen kertoimien määrittäminen siten, että ennustajan virhe on pienin mahdollinen, vaatii aluksi kokonaisvirheen lausumista kerroinkomponenttien ja syötevektorin avulla

$$E = \sum_{n=0}^{M} e^2(n) = \sum_{n=0}^{M}\left[d(n) - \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k)\right]^2 \tag{4}$$
$$= \sum_{n=0}^{M} d^2(n) - 2\sum_{k=0}^{N-1} h(k)r_{dx}(k) + \sum_{k=0}^{N-1}\sum_{l=0}^{N-1} h(k)h(l)r_{xx}(k-l)$$

jossa

$$r_{dx}(k) = \sum_{n=0}^{M} d(n)x(n-k), \quad 0 \le k \le N-1 \tag{5}$$
$$r_{xx}(k) = \sum_{n=0}^{M} x(n)x(n+k), \quad 0 \le k \le N-1$$

$r_{dx}(k)$ on ristikorrelaatio todellisen arvon $y(n)$ ja ennusteen välillä, ja $r_{xx}(k)$ on syötevektorin $x(n)$ autokorrelaatio. Korrelaatiot ovat mittareita jotka esittävät signaalien välistä tilastollisia riippuvuutta.

Virheen summat ovat Wiener-suotimen kertoimien neliöllinen yhtälö. Siksi virheen minimointi kertoimien suhteen tuottaa lineaaristen yhtälöiden ryhmän. Differentioimalla virheen suhteen , ja saattamalla tämä differentiaali nollaksi, saadaan

$$\frac{\partial E}{\partial h(k)} = 0, \quad m = 0,1,\ldots,N-1, \tag{6}$$

ja siten

$$\sum_{k=0}^{N-1} h(k)r_{xx}(k-m) = r_{dx}(m), \; m = 0,1,\ldots,N-1. \tag{7}$$

Matriisimuodossa tämä voidaan lausua

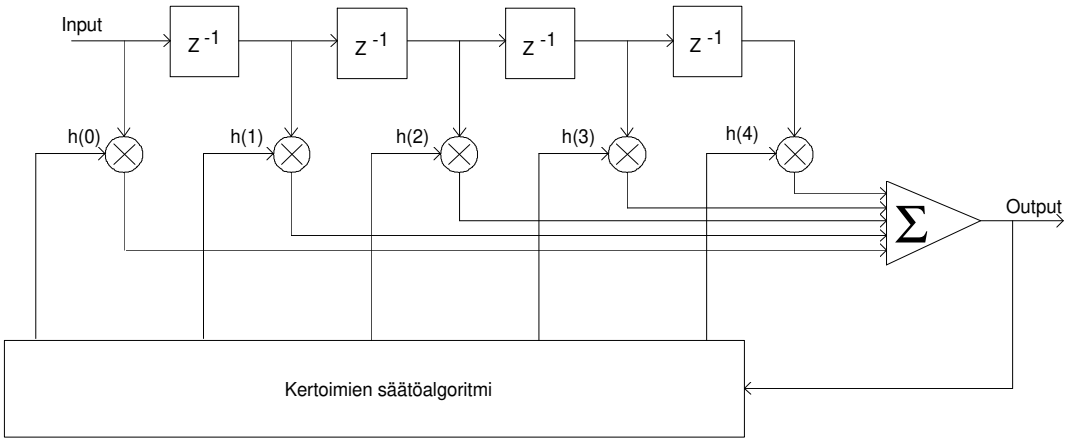
$$\mathbf{R}_{xx}\mathbf{h} = \mathbf{d}, \tag{8}$$

jossa

$$\mathbf{R_{xx}} = \begin{bmatrix} r_{xx}(0) & \cdots & r_{xx}(N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}(N-1) & \cdots & r_{xx}(0) \end{bmatrix}. \tag{9}$$
$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} r_{dx}(0) \\ \vdots \\ r_{dx}(N-1) \end{bmatrix}$$

Yhtälöryhmää (8) kutsutaan normaaliyhtälöiksi. Intuitivisesti yhtälöryhmä on helposti miellettävissä, signaalin tilastolliset ominaisuudet (autokorrelaatio) kerrotaan suodinkertoimilla ja tulokseksi saadaan halutun signaalin ja alkuperäisen signaalin väliset tilastolliset ominaisuudet (ristikorrelaatio). Wiener-suodin eroaa perinteisestä suotimesta vain siten, että

[1]Tässä esityksessä matriisit on merkitty lihavoinnilla.



Kuva 2: Adaptiivisen suotimen rakenne

suodinkertoimia tarkastellaan signaalien tilastollisia ominaisuuksia silmälläpitäen eikä signaalin taajuustasoa. Itse suodatin käsittelee kuitenkin samoja aikatasossa olevia signaaleja kuin perinteisetkin suotimet mikä on kuvasta 1 nähtävissä. Jos matriisin $\mathbf{R}_{xx}$ käänteismatriisi on olemassa, voidaan pienimmän keskimääräisen neliöllisen virheen mielessä optimaalisen Wiener-suotimen kertoimet laskea yhtälöstä

$$\mathbf{h} = \mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{d}. \tag{10}$$

Mikäli ympäristön signaalien ominaisuudet ovat tiedossa (signaalien auto- ja ristikorrelaatiomatriisit tunnetaan), yhtälön (10) avulla saadaan optimaalinen suodin signaalin havaitsemiseksi kohinasta tai signaalin ennustamiseksi. Wiener-suotimella on kuitenkin muutamia rajoituksia

1. Suotimen kertoimien määrittäminen edellyttää signaalien tilastollisten ominaisuuksien tuntemusta, ja lisäksi niiden tulee olla stationäärisiä, eli niiden tulee olla muuttumattomia ajan suhteen.
2. Matriisin kääntäminen on erittäin työläs operaatio mikäli matriisi on suurikokoinen kuten yleensä aina signaalinkäsittelyn ongelmissa.

Matriisin kääntämiseen on kehitetty tehokkaita rekursiivisia menetelmiä, mm. Levinson-Durbin - iteratiivinen normaaliyhtälöiden ratkaisu. Matriisin kääntäminen on kuitenkin laskennallisesti vielä pieni rasite kun otetaan huomioon että tilastollisten ominaisuuksien määritteleminen vaatii tyypillisesti *LN* operaatiota jossa *L* on syötejonon pituus. Laskentaa voidaan kuitenkin helpottaa huomaamalla, että näytteitä tulee vain yksi kerrallaan, ja tilastollisen ominaisuudet muuttuvat vain vähän näytteen tullessa suodattimeen. Tätä voidaan hyödyntää tekemällä suodattimen ominaisuuksien laskenta rekursiiviseksi, eräs tämäntyyppinen suodatinrakenne on *Kalman-suodin*. Normaaliyhtälöitä ei siis suoraan yleensä käytetä suotimien kertoimien määrittelemiseen.

Adaptiivinen Wiener-suodin

Alkuperäinen Wiener-suodin on määritelty vain stationäärisille signaaleille. Käytännössä signaalien ominaisuudet muuttuvat, ja tarvitaankin suotimia jotka mukautuvat muuttuviin ympäristöolosuhteisiin, tämäntyyppisen adaptiivisen suotimen lohkokaavio on esitetty kuvassa 2. Kalman-algoritmi on eräs menettelytapa suotimen kertoimien säätämiseksi. Algoritmi on kuitenkin vielä melko raskas laskettava, joten yksinkertaisempi menettelytapa olisi suotavaa. Wiener-suotimen kertoimia voidaan yrittää säätää siten, että keskimääräinen neliöllinen virhe minimoituu. Tämä voidaan formuloida yhtälöksi

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) - \frac{1}{2}\beta\nabla_h E(n). \tag{11}$$

Perinteisellä talonpoikaisjärjellä on yhtälö (11) helposti ymmärrettävissä, suodattimen kertoimia säädetään siihen suuntaan että kokonaisvirhe pienenee. Komponenteittain virheen gradientti kerroinvektorin suhteen voidaan lausua muodossa

$$\frac{\partial E}{\partial h(k)} = 2\mathrm{E}\left[e(n)\frac{\partial e(n)}{\partial h(k)}\right], \quad k = 0,\ldots,N. \tag{12}$$

Virheen e(n) derivaatta h(k):n suhteen voidaan esittää huomioimalla suodinyhtälö (2) ja virheen määritelmä muodossa

$$\frac{\partial e(n)}{\partial h(k)} = -x(n-k). \tag{13}$$

Sijoittamalla (13) yhtälöön (12), saadaan virheen differentiaali kertoimen suhteen lausuttua muodossa

$$\frac{\partial e(n)}{\partial h(k)} = -2\mathrm{E}\big[e(n)x(n-k)\big]. \tag{14}$$

Sijoittamalla (14) yhtälöön (11) voidaan gradienttipohjaisen suotimen kertoimien päivitys esittää muodossa

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \beta \mathrm{E}[e(n)\mathbf{x}(n)]. \quad (15)$$

Kerroin β määrää adaptoinnin nopeuden. Mitä suurempi kerroin on, niin sitä tehokkaammin virhe vaikuttaa suodinkertoimien säätöön. Mikäli kerroin on liian suuri, suodinkertoimet vaeltelevat villisti optimin ympärillä mutta koska säädöt ovat liian suuria, kertoimet eivät koskaan saavuta optimia. Liian pieni adaptointikertoimen β arvo taas tekee adaptoinnista hitaan, jolloin suodin ei välttämättä kykene riittävän nopeasti seuraamaan signaalien ominaisuuksien muuttumista. Adaptointikertoimen arvo riippuu suodattimen pituudesta (sen kertoimien määrästä) sekä itse signaalin luonteesta, mutta tyypillinen arvo adaptointivakiolle voisi olla luokkaa 0,01...0,2.

LMS-algoritmi

Erittäin käyttökelpoinen Wiener-suotimen kertoimien säätöalgoritmi saadaan kun kaavassa (15) esiintyvää odotusarvoa estimoidaan odotusarvon senhetkisellä argumentilla, siis

$$\hat{\mathrm{E}}[e(n)x(n-k)] = e(n)x(n-k). \quad (16)$$

Sijoittamalla estimaatti (16) kaavaan (15), saadaan *LMS-algoritmi* (Least Mean Square) suotimien kertoimien päivittämiseksi

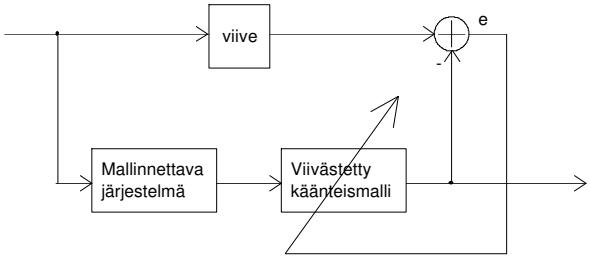
$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \beta[e(n)\mathbf{x}(n)]. \quad (17)$$

Bernard Widrow kehitti 1959 LMS-algoritmin yhdessä Marcian E. Hoffin (joka myöhemmin kunnostautui kehittelemällä Intelille mikroprosessorin) kanssa neuroverkkojen neuronien opetusalgoritmiksi hahmontunnistustehtäviin. 1960-luvulla adaptiivisia järjestelmiä tutkittiin kiivaasti ja erilaisia uusia sovellusalueita haeskeltiin. Suurin kaupallinen menestys lienee ollut 1960-luvun puolivälin tutkimusten tuloksista Bellin laboratoriossa R. W. Luckyn johdolla jotka tähtäsivät adaptiivisen ekvalisaattorin käyttöön nopeilla puhelinverkkodatayhteyksillä. LMS-algoritmi on ollut erittäin suosittu lähinnä siksi, että sen toteuttaminen on laskennallisesti erittäin keveätä. Suurin puute LMS-algoritmilla on sen adaptoinnin hitaus vaikkapa. Kalman-algoritmiin verrattuna. Tämän voidaan katsoa johtuvan lähinnä siitä, että suodinkertoimia ei säädetä yksilöllisesti, vaan kaikkia kertoimia säädellään samalla nopeudella.

LMS-algoritmin toiminta on helppo mieltää havaitsemalla että suotimen kertoimien säätöalgoritmi on tavallaan takaisinkytketty säätöpiiri.

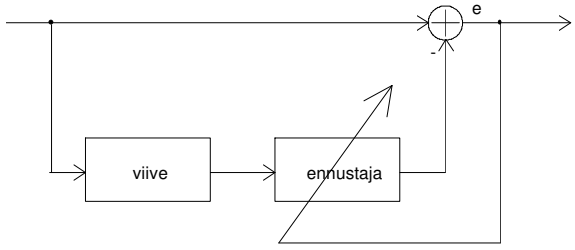
Adaptiivisen signaalinkäsittelyn sovelluksia

Tärkeimmät adaptiivisen signaalinkäsittelyn alueet ovat systeemin mallinnus ja ennustaminen. Näistä kahdesta perusalueesta voidaan johtaa useita eri sovelluskohtaisia variaatioita. Mallinnuksessa pyritään etsimään havaittavan systeemin siirtofunktio.



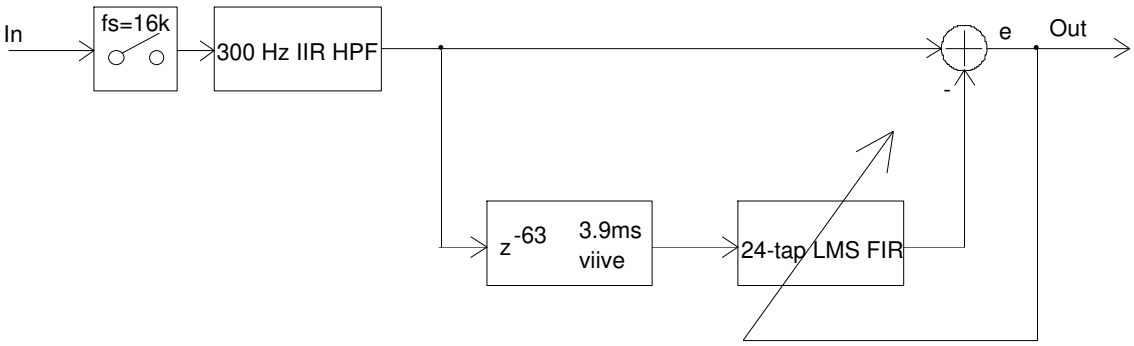
Kuva 3: Järjestelmän käänteisfunktion mallittaminen

Kuvassa 3 on esitetty eräs mallintamisen järjestelmälohkokaavio. Siinä pyritään hakemaan tuntemattomalle järjestelmälle käänteismalli. Tämä tapahtuu siten, että mallitettavan järjestelmän perään on kytketty adaptiivinen järjestelmä jonka parametreja pyritään säätämään niin että käänteismallin ulostulo vastaa mallinnettavaan järjestelmään syötettyä signaalia. Tämän tyyppinen on tilanne tietoliikennetekniikassa adaptiivisessa ekvalisoinnissa. Siinä mallinnettavana järjestelmänä on tiedonsiirtokanava, ja käänteismallin avulla pyritään kumoamaan tiedonsiirtokanavan vääristävä vaikutus kanavalle lähetettyihin pulsseihin. Adaptiivisessa ekvalisoinnissa vertailtava signaalia ei saada viivästettynä, vaan vastaanottimen päätöksentekoelimeltä. Päätöksenteon virheet ohjaavat adaptiivista suodinta siten että virheiden keskimääräinen neliöllinen virhe minimoituu.



Kuva 4: Signaalin ennustaminen

Kuvassa 4 on esitetty signaalin ennustamisen hyödyntämistä häiriön poistosovellutuksessa (*ALE, Adaptive Line Enhancer*). Ennustaja pyrkii ennustamaan häiriön, ja tämä ennustettu häiriö vähennetään vastaanotetusta signaalista. Mikäli ennustus on hyvä, voidaan häiriösignaali poistaa hyötysignaalista tehokkaasti. Tämäntyyppinen suodatus perustuu häiriösignaalin ja hyötysignaalien erottamiseen toisistaan poikkeavien tilastollisten ominaisuuksien avulla. Häiriösignaalilla oletetaan olevan voimakas lyhyen ajan autokorrelaatio, kun taas hyötysignaalin katsotaan omaavan enemmän kohinan kaltaisen luonteen. **Signaalit voivat siis olla taajuustasossa päällekkäin kunhan vain niiden tilastolliset ominaisuudet poikkeavat riittävästi toisistaan.**



Kuva 5: Häiriönpoistoesimerkki

Samaa menettelyä voidaan käyttää myös spektriestimoinnissa, adaptiivinen suodin mukautuu kohinaan hautautuneeseen korreloituvaan signaaliin, ja suotimen kertoimista saadaan korreloituvan signaalin siirtofunktio. Taajuustasalueeseen tämä voidaan muuttaa vaikkapa FFT:llä. Menettelystä on etua laskennallisessa mielessä mikäli estimoitavat signaalit ovat heikkoja jolloin tarvitaan perinteisessä periodogrammimenettelyssä paljon keskiarvoistusta.

Käytännön esimerkki

Eräänä käytännön esimerkkinä adaptiivisesta signaalinkäsittelystä tarkastellaan amatöörikäyttöön soveltuvaa häiriösignaalin suodatusta. Tämä on siis tyypillinen adaptiivisen ennustajan sovellus. Tarkoituksena on poistaa jaksolliset, tyypillisesti voimakkaasti sinimuotoiset signaalit pois vastaanotettavasta puhesignaalista. Näiden häiriösignaalien lyhyen ajan korrelaatio on huomattavasti suurempi kuin puhesignaalin, joka muistuttaa lähinnä luonteeltaan kohinaa. Häiriösignaalin suodattimen lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.

Signaali näytteistetään 16 kHz:n taajuudella ja aluksi sen matalataajuiset komponentit suodatetaan pois, sillä ne eivät sisällä puhesignaalin kannalta oleellista informaatiota. Tämän jälkeen signaalia viivästetään 3.9 ms ja se johdetaan adaptiiviseen suotimeen. Suotimen kertoimia säädetään siten että signaalit joilla on korrelaatiota pidemmän ajan päässä kuin 3.9 ms vaimenevat voimakkaasti. Muut signaalit pääsevät kutakuinkin vaimenematta ulos. Suotimen kertoimien adaptointiin käytettiin hiukan modifioitua LMS-algoritmia

$$h_n(k) = \gamma h_{n-1}(k) + \beta e(n) x(n-k), k = 0, \ldots, N-1. \qquad (18)$$

Jos signaali sisältää hiljaisia kohtia, niin perus-LMS-algortimi ei kykene muuttamaan kertoimia kovin nopeasti (korjaustermi pieni koska *x(n)* on pieni). Mikäli signaali sisältää vielä kohinaa, niin kertoimet vaeltavat päämäärättömästi vahvistaen suhteettoman paljon signaalin kohinaa. Tämä voidaan estää modifioimalla algortimia siten, että se pyrkii hitaasti säätämään kertoimia nollaksi. Yhtälön (18) kuvaamassa algoritmissa tämä on toteutettu kertomalla alkuperäinen suodinkerroin tekijällä γ, joka saa tyypillisesti luokkaa 0,99996 olevia arvoja.

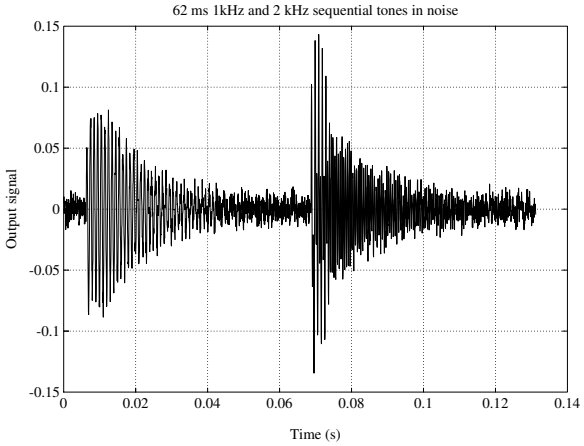
Häiriönpoistosuodin toteutettiin Motorolan DSP56001 signaaliprosessorille ALEF NULL -ryhmittymän DSP CARD 4 -signaaliprosessorikortille. Kortilla on A/D ja D/A -muuntimet sekä EPROM-muistia joten kortti saadaan toimimaan autonomisesti. Tämä on etu silloin kun halutaan yksinkertaisesti käytettävissä oleva järjestelmä—tässä tapauksessa kortille asennettiin EPROM jossa on tässä esitetty häiriönpoistoalgortimi.

Algoritmin ohjelmallinen toteutus on suoraviivainen hyödyntäen DSP56001:n monipuolisia rengaspuskuriominaisuuksia viivelinjoihin sekä suodattimen tilojen varastointiin. Ohjelmakoodista heijastuu myös signaaliprosessoreissa käytetty Harward-arkkitehtuurin käyttö, eli ohjelmamuistista ja datamuistista haetaan samanaikaisesti informaatiota eri väylien kautta. Tämäntyyppiseen ratkaisuun on jouduttu, sillä perinteisessä von Neumann arkkitehtuurissa tehokkuuden pullonkaulaksi tulee helposti juuri liikenne muistin ja keskusyksikön välillä. DSP56001:n assembler-kielessä Harward-arkkitehtuuri näkyy siinä, että samalla käskyllä voidaan esittää aritmeettislooginen operaatio sekä datansiirto. Esimerkiksi käsky `mac x0,y0,a x:(r1)+,x0 y:(r6)+,y0` suorittaa kertolaskun kahden rekisterin (`x0` ja `y0`) välillä, summaa sen akkuun (`a` rekisteri), siirtää datamuistista näytteen rekisteriin `x0` ja suodinkertoimen rekisteriin `y0` ja lopuksi päivittää näyte- ja kerrointaulukoiden osoiterekistereitä. Yhden käskyrivin suorittaminen aikaansaa siis kuusi operaatiota. Kun yhden käskyn suorittamiseen kuluu DSP CARD 4:ssa aikaa 74 ns, voidaan tavallaan puhua 81 MIPS:n laskentatehosta.

Seuraavassa on esitetty häiriönpoistosuotimen keskeinen laskentasilmukka:

```
; Wiener-suodin
   clr   a          x:(r1)+,x0    y:(r6)+,y0
   rep   #lmslen-1
   mac   x0,y0,a    x:(r1)+,x0    y:(r6)+,y0
   macr  x0,y0,a    x:(r1)-,x0    y:(r6)-,y0

; laske virhe (e = D - Y) x1 rekisteriin
   neg   a          #decay,y1
   add   x1,a       #beta,x0
   move  a,x1

; virhe on ohjelman lähtösignaali
   move             x1,y:(r2)+n2

; suotimen kertoimien päivitys LMS:llä
   mpyr  x0,x1,a    r6,r4         ; x1=beta*e
   move  a,x1

   move             x:(r1)-,x0    y:(r6)-,y0
   mpy   y0,y1,a
   macr  x0,x1,a    x:(r1)-,x0    y:(r6)-,y0

   do    #lmslen-1,adaloop
   mpy   y0,y1,a    a,y:(r4)-
   macr  x0,x1,a    x:(r1)-,x0    y:(r6)-,y0
adaloop

   move             a,y:(r4)-
   move             x:(r1)+,x0    y:(r6)+,y0
   move             x:(r1)+,x0    y:(r6)+,y0
```

Aluksi suoritetaan normaali FIR-suodatus sisääntulleelle signaalille. Tämän suodatuksen teko on helppoa, sillä signaaliprosessorien rakenne on yleensä suunniteltu tämäntyyppisen tulojen summa laskentaa silmälläpitäen. Suodattimen lähtö vähennetään syötesignaalista virheen muodostamiseksi. Tämä virhesignaali on samalla häiriönpoistosuotimen ulostulo ja LMS-algoritmin ohjaussignaali. LMS-algoritmia varten virhe kerrotaan adaptointivakiolla β ja talletetaan rekisteriin. Suotimen kertoimia päivitetään yhtälön (18) mukaisesti.
Suodattimen toimintaa on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Häiriönpoistosuodattimen adaptoituminen

Kuvassa esitetään tilanne jossa valkoiseen kohinaan on summattu aluksi 1 kHz siniaaltoa, ja sitten 2 kHz siniaaltoa. Nähdään, että suodin adaptoituu n. 30 ms:ssa periodiseen (voimakkaasti korreloivaan) signaaliin ja poistaa sen vaikutuksen jättäen puhesignaalia matkivan kohinasignaalin ennalleen.

Kirjallisuutta

[1] Alexander, S., T., “Adaptive Signal Processing”, Springer-Verlag, 1986

[2] Haykin, S., “Adaptive Filter Theory”, Prentice-Hall, 1991

[3] Estola, K-P, Vähä, P., “DSP-kurssi, Osa 5, Adaptiivinen signaalinkäsittely”, Prosessori 9/92

[4] Reyer, S., E., “Using The LMS Algorithm For QRM and QRN Reduction”, QEX, September 1992, s. 3–8