

AKTIIVINEN MELUNVAIMENNUS ILMASTOINTIPUTKESSA

Vesa Välimäki¹, Marko Antila², Seppo Rantala³ ja Jukka Linjama⁴

¹TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, PL 3000, 02015 TKK (Espoo)

²VTT Valmistustekniikka, Turvallisuustekniikka, PL 1701, 33101 Tampere

³VTT Automaatio, Koneautomaatio, PL 13021, 33101 Tampere

⁴VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja konetekniikka, PL 1705, 02044 VTT (Espoo)

Vesa.Valimaki@hut.fi, Marko.Antila@vtt.fi, Seppo.Rantala@vtt.fi, Jukka.Linjama@vtt.fi

1 JOHDANTO

Aktiivinen melunvaimennus tarkoittaa häiritsevän äänen vaimentamista “vastamelun” avulla. Periaate on tunnettu yli 60 vuoden ajan, mutta vasta 1980-luvulta alkaen signaaliprosessorit ja kehittyneet digitaaliset signaalinkäsittelyalgoritmit ovat mahdollistaneet käytännön vaimennusjärjestelmien kehittämisen [1]. Nykyisin aktiivista melunvaimennusta käytetään esimerkiksi ilmastointijärjestelmissä, lentokoneiden matkustamoissa ja kuulosuojaimissa [2].

Ilmastointijärjestelmissä aktiivisen melunvaimennuksen edut perinteisiin passiivisiin vaimentimiin verrattuna ovat (1) helpompi asennus, (2) vähäisempi virtausvastus ja (3) parempi vaimennus pienillä taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla (alle noin 200 Hz) aktiivinen vaimennin on passiivista edullisempi ratkaisu, koska passiivisen vaimennusmateriaalin määrän olisi oltava valtava aallonpituuden ollessa suuri. Aktiivinen järjestelmä puolestaan pystyy vaimentamaan pieniä taajuuksia vaivatta, jos siinä on tehokkaasti pieniä taajuuksia säteilevä äänilähde. Tämä on helppo toteuttaa tavallisilla kaiuttimilla.

Tässä paperissa esittelemme AKTIVA-hankkeessa [3] tekemäämme tutkimusta ilmastointilaitteen tuottaman häiritsevän melun vaimentamisesta [4]. Työmme on jatkoa Jukka Linjaman Akustiikkapäivillä 1995 esittämälle vakiosäätöiselle vaimentimelle [5]. Olemme toteuttaneet myötäkytketyn adaptiivisen säätöjärjestelmän, jossa puhaltimen läheltä – vaimentavaan kaiuttimeen nähden ylävirran puolelta – mitattua melua käytetään adaptiivisen suodinalgoritmin referenssisignaalina (tulosignaalina). Digitaalisella signaaliprosessorilla toteutettu adaptiivinen suodin muokkaa melusta vastamelua, joka syötetään kaiuttimeen. Ilmastointiputken avoimen pään suulle on sijoitettu virhemikrofoni, josta saatava signaali ohjaa suodattimen adaptointia ja sitä voidaan käyttää järjestelmän toiminnan monitorointiin.

Myötäkytketyn aktiivisen melunvaimentimen saavuttama vaimennus riippuu monista tekijöistä. Esimerkiksi melusignaalin tehospektrin vaihteleva muoto, akustinen takaisinkytkentä kaiuttimeesta referenssimikrofoniin, turbulenssista aiheutuva kohina mikrofoniin kohdalla sekä sähköiset häiriöt voivat huonontaa vaimennusta merkittävästi. Nämä tekijät asettavat haasteita kaikille järjestelmän osille ja erityisesti digitaaliselle säätöjärjestelmälle, jonka on kyettävä optimoimaan vastamelusignaali häiriötekijöistä riippumatta.

Yksi tutkimusjärjestelmämme kiinnostavimpia osia on uudentyyppinen, litteä, EMF-kalvoon perustuva kaiutin. Sen voi ohuutensa vuoksi asentaa ilmastointiputkeen poikittain virtausvastuksen kasvamatta. Nykyisten EMF-kaiuttimien ainoa haittapuoli on huono herkkyys pienillä taajuuksilla (alle 100 Hz). Ilmastointilaitteiden lapataajuus on yleensä yli 100 Hz, joten kovin pieniä taajuuksia ei välttämättä tarvita.

2 ADAPTIIVISET SIGNAALINKÄSITTELYALGORITMIT

Aktiivisessa melunvaimennuksessa tarvitaan adaptiivista signaalinkäsittelyä. Järjestelmän adaptoitumisen on oltava riittävän nopeaa ja robustia, eli adaptoituminen ei saa olla kovin herkkä akustisen ympäristön muutoksille. Järjestelmän on pystyttävä sopeutumaan akustiseen ympäristöönsä, kuten mikrofoniin ja kaiuttimen sijaintiin, putken päiden aiheuttamiin heijastuksiin ja akustiseen (tai mekaaniseen) takaisinkytkentään kaiuttimesta referenssimikrofoniin.

Toteutettu adaptiivinen aktiivivaimennin toimii kahdessa vaiheessa, jotka ovat kalibrointi ja vaimennus. Kalibrointivaiheessa adaptoidaan kahta suodinta, jotka mallintavat sähköakustisen siirtotien impulssivasteen kaiuttimesta referenssi- ja virhemikrofoniin. Vaimennusvaiheessa käytetään kolmatta adaptiivista suodinta (pääsuodin) estimoimaan kuinka referenssisignaalia pitää suodattaa, jotta se kumoaisi häiritsevän melusignaalin kaiuttimen kohdalla. Seuraavaksi esitellään lyhyesti tässä työssä käytetyt adaptiiviset algoritmit.

Adaptiivisten suodattimien ominaisuuksia säädetään automaattisesti LMS-algoritmeilla (engl. least-mean-square algorithm), joka on yleisin adaptiiviseen suodatukseen käytetty laskenta-menetelmä [6]. LMS-algoritmi käyttää mikrofonilla mitattujen melusignaalin ja virhesignaalin erotusta kertoimien säätämiseen. Lisätietoa LMS-algoritmeista kannattaa hakea esimerkiksi kirjoista Widrow & Stearns [6] ja Haykin [7].

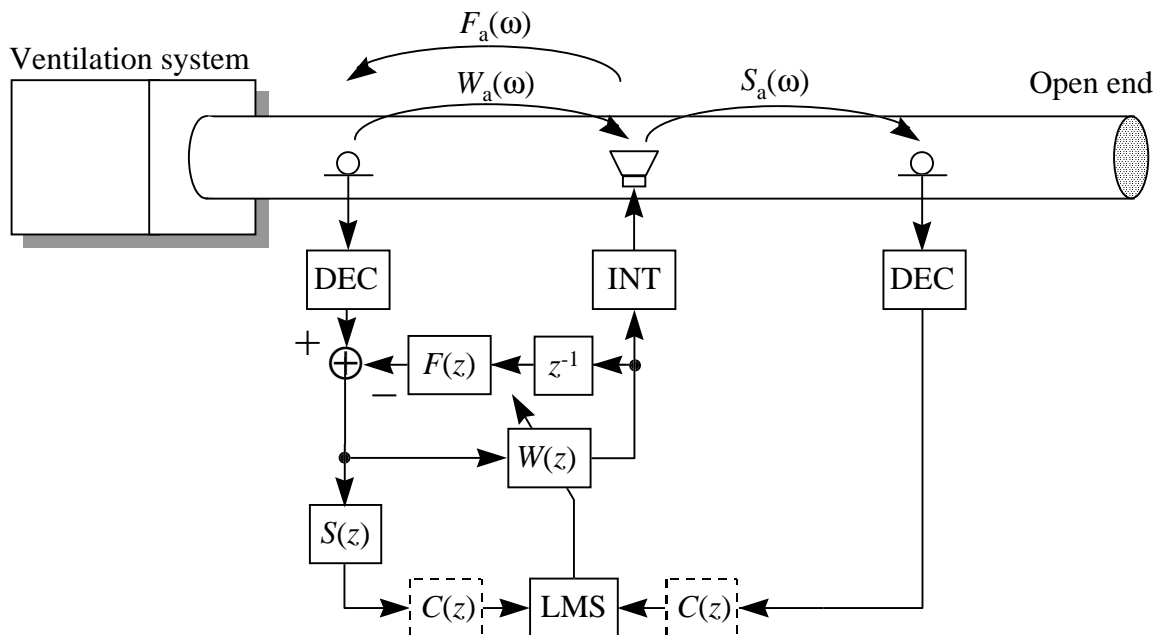
2.1 FXLMS-Algoritmi

Aktiivisessa melunvaimennuksessa LMS-algoritmin toteutus on ongelmallinen, koska siinä tarvitaan virhesignaali täsmälleen vaimentavan kaiuttimen kohdalla. Virhesignaali mitataan kuitenkin käytännössä mikrofonilla, joka ei saa olla kaiuttimen lähikentässä vaan mieluiten kaukana ilmastointiputken suulla. Sähköakustinen siirtotie adaptiivisen suodattimen lähdöstä virhemikrofoniin on nimeltään virhepolku. Se pitää ottaa huomioon adaptiivisessa algoritmista, jotta suodatin osaisi säätää kertoimiaan oikealla tavalla. FXLMS-algoritmi (engl. filtered-X least-mean-square algorithm) sisältää virhepolkua mallintavan siirtofunktion $S(z)$, jota käytetään referenssisignaalin esiprosessointiin (ks. kuva 1). Tämän tekniikan kehittivät 1970- ja 80-lukujen vaihteessa ilmeisesti toisistaan riippumatta Burgess [8], Morgan [2] ja Widrow [6]. FXLMS-algoritmi on tärkein aktiivisissa melunvaimennusjärjestelmissä käytetty adaptiivinen algoritmi [1], [2]. Toteuttamamme järjestelmä käyttää FXLMS-algoritmia pääsuotimen adaptointiin vaimennusvaiheessa.

2.2 FELMS-Algoritmi

Olemme tarkastelleet kaiuttimen taajuusvasteen vaikutusta vaimennustulokseen ja havainneet että kaiuttimien ylipäästötyyppinen vaste pienillä taajuuksilla häiritsee pääsuodattimen adaptoitumista: suodatin pyrkii lisäämään vahvistusta pienillä taajuuksilla, koska virhesignaali ei pienene, koska kaiutin ei pysty säteilemään pieniä taajuuksia. Tämä johtaa noidankehään. Pahimmassa tapauksessa suodattimen kehittämä suuri vahvistus pienillä taajuuksilla aiheuttaa DA-muuntimen tai vahvistimen ylikuormittumista tai kaiuttimen särön kasvun. Tämän havainnon seurauksena päätimme lisätä painotussuotimen $C(z)$ muokkaamaan FXLMS-algoritmin referenssi- ja virhesignaalia (ks. kuva 1). Tämän idean ovat aiemmin esittäneet Kuo ja Tsai [9], ja menetelmän nimi on FELMS-algoritmi (engl. filtered-E LMS algorithm) (ks. myös [2], ss. 98–99). Ainoa ero FXLMS-algoritmiin nähden on painotussuodin, joka mahdol-

listaa vaimennuksen keskittämisen halutulle taajisuusalueelle. Ratkaisumme on aikaderivaattaa approksimoiva digitaalisuodin $C(z) = 0.5 - 0.5z^{-1}$, joka vaimentaa pieniä taajuuksia.



Kuva 1. Melunvaimennus FXLMS-algoritmin ja akustisen takaisinkytkennän eliminoinnin avulla. Pääsuodin $W(z)$ mallintaa akustista siirtotietä $W_a(\omega)$ referenssimikrofonista kaiuttimeen. Suotimella $F(z)$ prosessoitu signaali vähennetään tulosignaalista takaisinkytkennän vähentämiseksi. Suotimien $C(z)$ käyttö LMS-algoritmin molemmiin puolin vastaa FELMS-algoritmia. Suotimien $F(z)$ ja $S(z)$ kertoimet ovat nyt vakioita, jotka on kopioitu kalibrointivaiheesta.

3 JÄRJESTELMÄN KUVAUS

Laitteiston keskeisen osan muodostaa Innovative Integration SBC32 -signaaliprosessorikortti. SBC32-kortti sisältää 4 nopeaa analogia-digitaali- ja digitaali-analogiamuunninta, joiden muunnosajat ovat 10 μ s and 5 μ s. Muunninten on oltava nopeita, koska referenssisignaali kulkee niiden molempien läpi ja sen on silti vielä ehdittävä kaiuttimen kohdalle vähintään yhtä nopeasti kuin melun – muuten vaimennusjärjestelmä on ei-kausallinen ja se ei sovellu laajakaistaisen (satunnaisen) melun vaimentamiseen.

Korkein taajuus, jota halutamme vaimentaa, on käytännössä noin 900 Hz, joka on ilmastointiputken ensimmäisen poikittaismoodin taajuus. Periaatteessa näytetaajuus voisi olla tasan 2 kertaa suurempi kuin suurin kiinnostava taajuus. Käytännössä näytetaajuus valitaan ainakin 2,2-kertaiseksi, jotta analogisen rekonstruktiosuodattimen ei tarvitsisi olla kovin jyrkkä. SBC32-kortilla olevien analogisten suodattimien ylärajataajuutta ei voida säätää kovin pieneksi ja siksi näytetaajuudeksi valittiin 5,0 kHz. Prosessorin sisäinen näytetaajuus on 2,5 kHz, ja näytetaajuutta muutetaan AD- ja DA-muunnosten yhteydessä tekijällä 2.

Signaalinkäsittelyohjelma toimii reaaliajassa ja se jakautuu kahteen osaan, pääsilmukkaan ja keskeytyspalvelurutiiniin. Pääsilmukka sisältää pääosan signaalinkäsittelyoperaatioista kun taas keskeytyspalvelurutiini päivittää AD- ja DA-muunnitimet ja muuttaa signaalin näytetaa-

juutta molemmissa tapauksissa. Arviomme mukaan prosessori ehtii suorittaa noin 600 käskyä yhdessä näytevälissä, kun näytetaajuus on 5,0 kHz. Tämä riittää mainiosti.

Pääsilmutta toimii eri tavalla kalibrointi- ja vaimennusvaiheessa. Kalibrointivaiheessa kaikki suodinkertoimet nollataan aluksi, ja sen jälkeen kahden adaptiivisen suodattimen kertoimia päivitetään jokaisessa näytevälissä, jotta saadaan estimoitua virhepolun ja akustisen takaisinkytkentäpolun impulssivasteet. Kalibrointivaihe kestää alle minuutin. Vaimennusvaiheessa ohjelmassa adaptoidaan pääsuodatinta, jonka tarkoitus on vaimentaa melua kuvan 1 mukaisesti. Vaimennusvaihe jatkuu kunnes käyttäjä pysäyttää ohjelman.

4 KOKEELLISIA TULOKSIA

Testasimme toteuttamaamme aktiivista vaimennusjärjestelmää monilla parametrien asetuksilla ja melusignaaleilla. Aluksi melulähteenä käytettiin puhaltimen paikalle asennettua kaiutinta, johon syötettiin sinisignaalia sekä laaja- ja kapeakaistaista kohinaa. Lopuksi kokeilimme järjestelmää puhaltimen toimiessa.

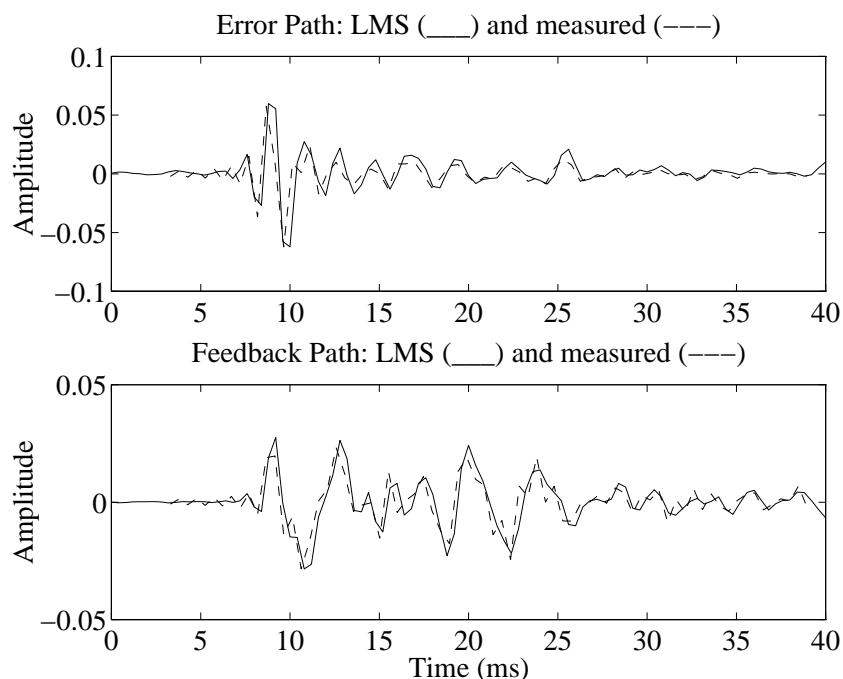
4.1 Virhe- ja takaisinkytkentäpolun mallien kalibrointi

Kalibrointivaiheessa adaptoidaan suodattimien $S(z)$ ja $F(z)$ kertoimet. Yhdessä kokeessa saadut lopulliset impulssivasteet (suotimien kerroinvektori) adaptoinnin päätyttyä esitetään kuvassa 2. Kummankin suotimen pituus on 101 näytettä, joka vastaa 40 ms, kun näytetaajuus on 2,5 kHz. Estimoidut impulssivasteet vaikuttavat luotettavilta, koska ne ovat alussa lähes nollija ja ne vaimenevat huipun jälkeen. Kuvassa 2 esitetään myös FFT-analyssaattorilla mitatut vastaavat impulssivasteet. Näitä mittaustuloksia on viivästetty (siirretty kuvassa oikealle) 3,3 ms, joka on 15-pituisista lineaarivaiheisista interpolointi- ja desimointisuotimista (3,2 ms) ja analogisesta rekonstruktiosuotimesta (0,1 ms) yhteensä koostuva aikaviive. Tarkastellessamme impulssivasteiden Fourier-muunnoksia havaitsimme, että tulokset vastaavat hyvin toisiaan ja että LMS-algoritmillä estimoidut vasteet sisältävät nollakohtia ja resonansseja oikeilla taajuuksilla kiinnostavimmalla taajuusalueella (yli 100 Hz), mutta LMS-algoritmin tuottavat taajuusvasteet ovat pehmenneet versioita FFT-analyssaattorilla mitatuista.

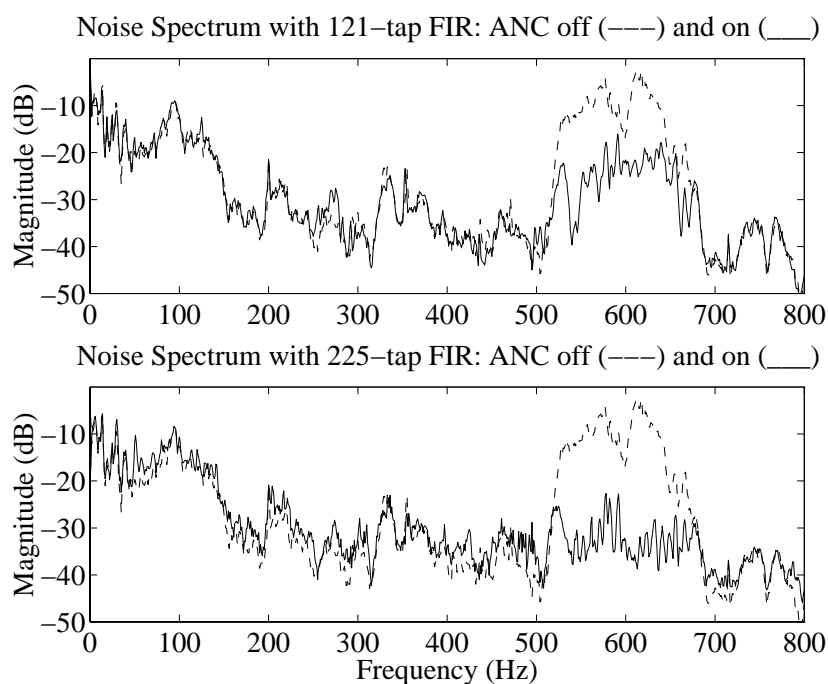
4.2 Laajakaistainen vaimennus sähköisellä referenssisignaalilla

Seuraavaksi esitämme sähköisellä referenssisignaalilla saatuja tuloksia. Melulähteenä käytettiin puhaltimen kohdalle asennettua kaiutinta ja ilmastointipuhallin oli pois päältä. Melulähteeseen (kaiutin) ja signaaliprosessorin referenssituloon syötettiin samaa testisignaalia, joka oli kaistarajoitettua kohinaa (keskitaajuus 600 Hz, kaistanleveys 100 Hz). Tässä kokeessa havaittiin, että pääsuodattimen $W(z)$ pituus eli kertoimien määrä vaikuttaa selvästi tuloksiin. Kuvassa 3 esitetään virhemikrofonin havaitseman jäännösmelun tehospektri kahdella eri suodinvektorin pituudella. Kuvan 3 yläosassa suotimen pituus on 121 (eli 38,4 ms) ja melu vaimenee noin 10 dB taajuuskaistalla 550–650 Hz.

Tässä tapauksessa kannattaa käyttää paljon pitempää adaptiivista FIR-suodatinta. Kuvan 3 alempi osa näyttää, että 225-pituisella (90 ms) suotimella saadaan parempi vaimennus kuin lyhyellä suotimella. Nyt vaimennus on keskimäärin 20 dB ja parhaimmillaan noin 30 dB taajuusalueella 610–620 Hz. Ilmeinen syy korkea-asteisen FIR-suotimen paremmuuteen on putken vähäinen vaimennus, josta johtuen mallinnettava impulssivaste on varsin pitkä.



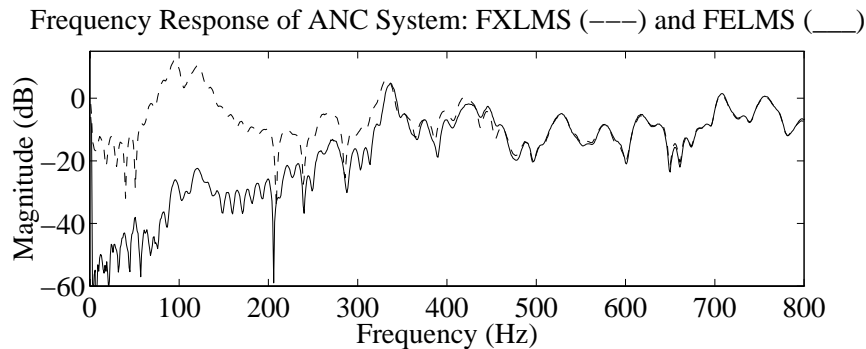
Kuva 2. Virhepolun (yllä) ja takaisinkytkentäpolun (alla) impulssivasteet (estimoitu 101-pituisella adaptiivisella FIR-suotimella) kalibrointivaiheen jälkeen (yhtenäinen viiva) ja FFT-analysaattorilla mitattuna (katkoviiva).



Kuva 3. Esimerkki adaptiivisen FIR-suotimen pituuden vaikutuksesta aktiivivaimentimen tehokkuuteen. Melusignaali on kaistarajoitettua kohinaa. Virhesignaalin tehospektri esitetään kun vaimennin on pois päältä (katkoviiva) ja päällä (yhtenäinen viiva). Ylemmässä kuvassa FIR-suotimen pituus on 121 kerrointa ja alemmassa 225.

4.3 FXLMS- ja FELMS-algoritmien vertailu

Vertasimme kuvan 1 mukaista FELMS-vaimennusjärjestelmää ja tavallista FXLMS-pohjaista järjestelmää, jossa suotimet $C(z)$ ovat 1. Referenssisignaali on laajakaistaista kohinaa. Kuva 4 näyttää pääsuotimen taajuusvasteen adaptoinnin päätyttyä. FXLMS-algoritmiin perustuvan järjestelmän vahvistus on suuri alle 200 Hz taajuuksilla, missä aktuaattori ei säteile kovin tehokkaasti. Joissain kokeissa tämä aiheutti vastamelusignaalin säröytymisen kaiuttimen ja vahvistimen ylikuormittumisen takia.



Kuva 4. Pääsuotimen taajuusvaste adaptoinnin jälkeen kun tulosignaali on laajakaistaista kohinaa. Katkoviiva vastaa FXLMS-algoritilla ja yhtenäinen viiva FELMS-algoritilla saatua vastetta.

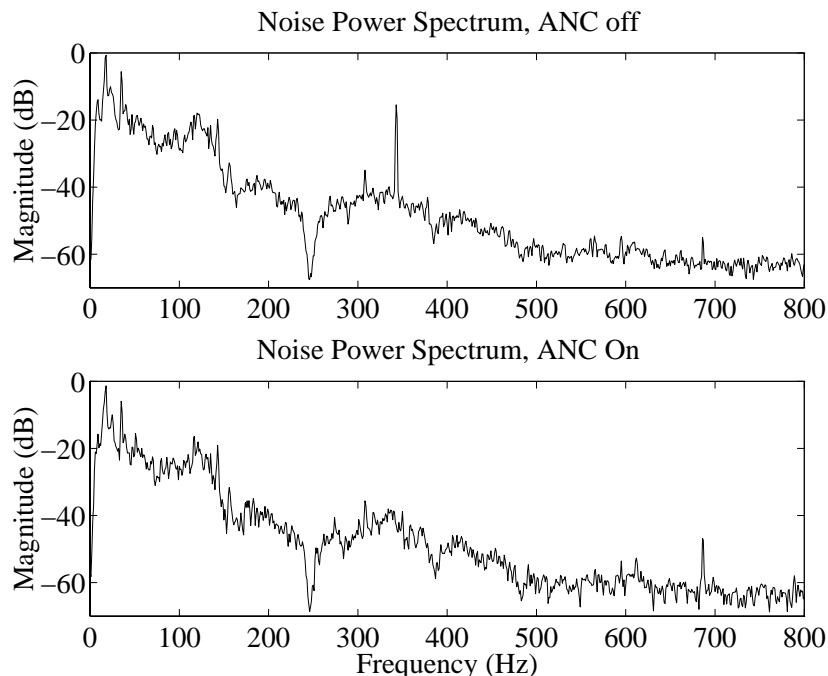
Yhtenäinen viiva kuvassa 4 on FELMS-pohjaisen vaimentimen pääsuotimen vaste, kun painotussuotimen siirtofunktio on $C(z) = 0.5 - 0.5z^{-1}$. Nyt vahvistus on pieni pienillä taajuuksilla ja säröytymisen riski muuntimissa, vahvistimessa tai kaiuttimessa on vähentynyt. Yli 300 Hz taajuuksilla vertailtavien järjestelmien toiminta on keskenään samanlaista. Joissain sovelluksissa differentiaattori ei ole sopiva painotussuodin, vaan voidaan joutua suunnittelemaan sovelluskohtainen suodin, joka riippuu kaiuttimen vasteesta.

4.4 Puhallinmelun vaimentaminen

Lopuksi tarkastelemme normaalia toimintatilannetta, jossa vaimenninta käytetään puhaltimen ollessa käytössä. HavaitSIMME että ilman pyörteilyn aiheuttama turbulenssikohina voi vakavasti häiritä vaimentimen toimintaa (ks. myös [1], ss. 178-179 ja [2], ss. 75-77). Vaimennettu melu (virhesignaali) ei voi olla energialtaan pienempää millään taajuudella kuin turbulenssikohina. Puhallinjärjestelmissä referenssi- ja virhesignaalin välinen koherenssi pienenee ilmavirran nopeuden kasvaessa. Antiturbulenssimikrofonit, joita jotkut valmistajat myyvät, parantaisivat tätä ongelmaa, mutta niitä ei ollut käytössä näitä kokeita tehtäessä. Käytämässämme mikrofoneissa oli kuitenkin luotimainen kartio, jonka tarkoitus on myöskin estää ilman pyörteilyä mikrofonin kohdalla.

Kuva 5 on esimerkki vaimennustuloksesta kun puhaltimen lapataajuus on 343 Hz. Melun tehospektrissä erottuu selvästi piikki tällä taajuudella (kuvan 5 ylempi osa). Kun vaimennin kytkettiin päälle, lapataajuus alkoi nopeasti vaimentua. Adaptoitumisen jälkeen tehospektrin piikki ei enää erotu (kuvan 5 alempi osa). Tässä esimerkissä melupiikki on vaimentunut noin 27 dB. Koherenssi taajuudella 343 Hz oli aluksi noin 1, mutta adaptoitumisen jälkeen se oli noin 0,1. Tässä tapauksessa lapataajuuden toinen harmoninen taajuudella 686 Hz vahvistui

hiukan. Tämä johtune kaiuttimen säröstä. Joillain lapataajuuksilla toinen harmoninen tai mikään muukaan taajuus ei vahvistunut lainkaan, vaan saavutettiin ainoastaan vaimentumista lapataajuudella. Parhaissa kokeilemissamme tapauksissa saavutettiin lievää vaimennusta myös kapealla kaistalla lapataajuuden ympärillä.



Kuva 5. Puhallinmelun vaimentuminen toteutettua aktiivivaimenninta käyttäen. Melun tehospektri esitetään kun vaimennin on pois päältä (yllä) ja päällä adaptoitumisen pysähtytyä (alla). Puhaltimen lapataajuudella 343 Hz saavutettu vaimennus on 27 dB.

5 LOPUKSI

Tässä paperissa olemme esittäneet signaaliprosessoripohjaisen melunvaimentimen tutkimus- ja kehitysympäristön sekä sillä saavutettuja kokeellisia tuloksia ja johtopäätöksiä. Keskeisimpiä tavoitteitamme ovat olleet ymmärtää puhallinvaimentimen suunnitteluun ja toteutukseen liittyviä ongelmia sekä oppia ratkaisemaan ne.

Toteuttamamme vaimennin perustuu myötäkytkettyyn adaptiiviseen säätöjärjestelmään, joka kalibroi itsensä automaattisesti ennen kuin vaimennus aloitetaan. Työmme kokeellisessa osassa muun muassa vertailtiin suosittua FXLMS-algoritmia ja yhtä sen muunnelmaa, FELMS-algoritmia, jolla voidaan ottaa huomioon vaimentavan kaiuttimen rajoitukset pienillä taajuuksilla ja estää komponenttien ylikuormittuminen. Yksi vaimennusjärjestelmämme erikoispiirre on uudenlainen litteä kaiutin, joka perustuu kotimaiseen EMF-teknologiaan. Kaiutin on kevyt ja se on helppo asentaa putken sisään ilmavirtauksen häiriintymättä.

Saavuttamamme vaimennustulokset ovat hyviä sekä kapea- että laajakaistaisella melulla. Vaimennus on parhaimmillaan noin 30 dB, ja melun häiritsevin osa, lapataajuuden ulina, saadaan vaimennettua kuulumattomiin.

Tutkimuksessamme on jatkossa tarkoitus tutkia vaihtoehtoisia adaptiivisia signaalinkäsittelyalgoritmeja sekä uusia aktuaattori- ja detektoriratkaisuja. Yksi keskeinen ongelma myötäkyt-

ketyssä aktiivisessa melunvaimennuksessa on akustinen takaisinkytkentä vaimentimen kaiuttimesta referenssimikrofoniin. Nykyisessä toteutuksessa takaisinkytkentä kumotaan sähköisesti adaptiivisen suodattimen avulla, joka on samankaltainen kuin puhelinjärjestelmissä käytetyt kaiunpoistosuodattimet (ks. kuva 1). Toinen, selvästi luonnollisempi ja akustisempi tapa olisi eliminoida takaisinkytkentä käyttäen yksisuuntaista aktuaattoria ja referenssidetektoria. Yksisuuntaisia aktuaattorirakenteita ovat kehittäneet Swinbanks [10], Winkler ja Elliott [11] sekä Uosukainen [12], [13], [14]. Yksisuuntaiset aktuaattorirakenteet koostuvat useasta kaiuttimesta, joihin syötetään sama signaali eri tavoin suodatettuna, jolloin ääni ei etene toiseen suuntaan (ylävirtaan) kun taas toiseen suuntaan (alavirtaan) saadaan haluttu etenevä ääniaalto. Samaa periaatetta voidaan käyttää myös yksisuuntaisten detektorien rakentamiseen.

KIITOKSET

Tämä TKK:n ja VTT:n välinen yhteistyö on ollut mahdollista Hannu Nykäsen (VTT Valmistustekniikka) johtaman kansallisen AKTIVA-tutkimushankkeen puitteissa. Lasse Lamula ja Pekka Virta VTT Valmistustekniikasta auttoivat demonstraatiojärjestelmien asentamisessa.

LÄHTEET

1. NELSON P A & ELLIOTT S J, *Active Control of Sound*. Academic Press, 1992.
2. KUO S M & MORGAN D R, *Active Noise Control Systems—Algorithms and DSP Implementations*. Wiley, 1996.
3. NYKÄNEN H, Aktiivinen äänenhallinta (AKTIVA) tutkimushanke. *Akustiikkapäivä 1995*, 25.–26.10.1995, Tampere, 13–18.
4. VÄLIMÄKI V, ANTILA M, RANTALA S & LINJAMA J, Adaptive noise cancellation in a ventilation duct using a digital signal processor. *DSP Scandinavia '97 Conf*, 3.–4.6.1997, Tukholma, Ruotsi, 151–156.
5. LINJAMA J, Puhallinkanavan aktiivinen äänenvaimennus vastaanilähteellä. *Akustiikkapäivä 1995*, 25.–26.10.1995, Tampere, 29–38.
6. WIDROW B & STEARNS S D, *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall, 1985.
7. HAYKIN S, *Adaptive Filter Theory. Third Edition*. Prentice-Hall, 1996.
8. BURGESS J C, Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation. *J Acoust Soc Am* **70**(1981)3, 715–726.
9. KUO S M & TSAI J, Residual noise shaping technique for active noise control systems. *J Acoust Soc Am* **95**(1994)3, 1665–1668.
10. SWINBANKS M A, The active control of sound propagating in long ducts. *J Sound and Vibr* **27**(1973)3, 411–436.
11. WINKLER J & ELLIOTT S J, Adaptive control of broadband sound in ducts using a pair of loudspeakers. *Acustica* **81**(1995)5, 475–488.
12. UOSUKAINEN S, Yhteen suuntaan säteilevät aktuaattorit kanavaäänien aktiivisessa vaimentamisessa. *Akustiikkapäivä 1995*, 25.–26.10.1995, Tampere, 19–28.
13. UOSUKAINEN S, Uni-directional actuators in the active attenuation of noise in ducts. *Proc Nordic Acoustical Meeting*, 12.–14.6.1996, Helsinki, 105–112.
14. UOSUKAINEN S & VÄLIMÄKI V, Viiveetön kaksielementtinen yksisuuntainen äänilähde aaltoputkessa. *Akustiikkapäivä 1997*, 8.–9.10.1997, Espoo.