

AKTIIVISEN ÄÄNENHALLINNAN PSYKOAKUSTINEN ARVIOINTI

Marko Antila ja Jari Kataja

VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1307, 33101 TAMPERE
marko.antila@vtt.fi

1 JOHDANTO

Aktiivinen äänenhallinta on menetelmä, jossa melua muokataan säädettävällä vastaäänellä. Aktiivisen äänenhallintajärjestelmän tavoitteena on tavallisesti minimoida muokattava äänikenttä. Usein järjestelmä vaimentaa niitä taajuuksia, joilla äänitaso on suurin. Tämä tapahtuu välittämättä siitä miltä jäljelle jäänyt ääni kuulostaa, ja tavoitteena on vain mahdollisimman suuri vaimennus. Aktiivisella äänenhallinnalla voidaan kuitenkin vaikuttaa myös melun häiritsevyyteen, jota voidaan arvioida psykoakustisten tunnuslukujen avulla. Joissain tapauksissa joudutaan vaimennuksen lisäksi jopa vahvistamaan tiettyjä äänikomponentteja halutun vaikutelman saavuttamiseksi. Kun käytössä ovat psykoakustiset kriteerit, voidaan puhua psykoakustisesta äänenhallinnasta.

2 PSYKOAKUSTISEN ÄÄNENHALLINNAN TUNNUSLUVUT

Psykoakustiset tunnusluvut ovat suureita, joilla kuvataan subjektiivisen kuulohavainnon mitta-asteikolla esitettäviä osatekijöitä [1]. Keskeisiä tunnuslukuja ovat subjektiivista äänenvoimakkuutta kuvaava äänekkyyys sekä tonaalisuus, joka kuvaa jaksollisten komponenttien esiintymistä. Yleensä aktiivisessa äänenhallinnassa pyritään ja pystytään vaikuttamaan suoraan äänekkyyteen ja tonaalisuuteen, ja sitä kautta epäsuorasti myös häiritsevyyteen.

Subjektiivisesti koettua äänenvoimakkuutta kutsutaan äänekkyydeksi (loudness). Sen mittayksikkö on soni. Yksi soni vastaa 1 kHz siniäänksen äänekkyyttä 40 dB:n äänenpainetasolla. Jokaista 10 dB:n lisäystä kohti äänekkyyys soneina kaksinkertaistuu. Äänekkyyys on keskeinen käsite, sillä äänekkyyysaistimuksen muodostumista koskeva teoria liittyy yhteen ja selittää monia kuulon ilmiöitä. Äänekkyyden laskentaa varten on standardoitu Zwickerin (ISO 532B) ja Stevensin (ISO532A) menetelmät.

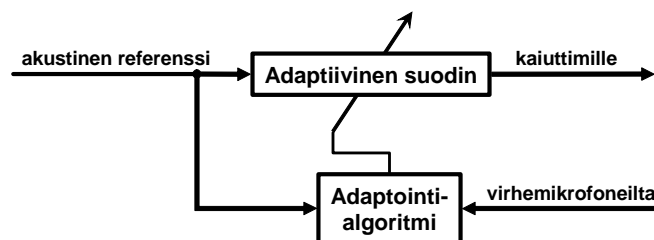
Tonaalisuus (tonality) kuvaa sitä, kuinka säännöllisen jaksollinen tai soinnillinen ääni on. Alhainen tonaalisuusaste merkitsee sitä, että äänessä ei kuulu jaksollisia ominaisuuksia. Ääriesimerkkinä on kohina.

Äänen häiritsevyys on monimutkainen ääneen liittyvää subjektiivinen tekijä. Häiritsevyys riippuu paitsi äänen lyhyt- ja pitkäaikaisista ominaisuuksista, myös lukuisista muista ympäristötekijöistä, henkilön psyykkisestä ja fyysisestä tilasta sekä kokemustaustasta. Laskennallinen häiritsevyys on useasta psykoakustisesta tunnusluvusta sopivilla painokertoimilla laskettu indeksiarvo, joka on kuitenkin aina jossain määrin tapauskohtainen ja arvioitsijariippuvainen. Psykoakustisia tunnuslukuja mittaavat laitteet ilmoittavat usein myös tämän indeksin [2], joka kuitenkin on aina siis vain yksi arvio häiritsevyydestä.

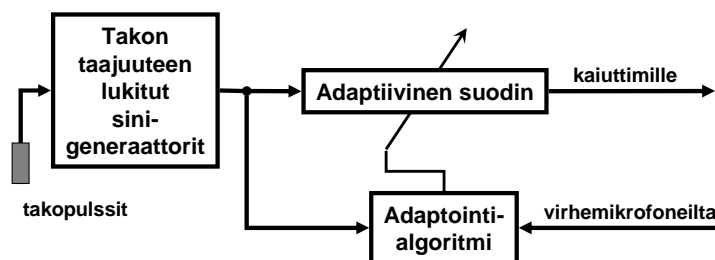
3 AKTIIVINEN ÄÄNENHALLINTA

Aktiivista äänenhallintaa käytetään tyypillisesti melun vaimentamiseen. Sääto perustuu yleensä myötäkytkentään (feedforward), jossa vaimennettavaa melua mitataan referenssisensorilla etukäteen ennen kuin se saavuttaa varsinaisen vaimennuspisteen. Mitatusta referenssisignaalista muodostetaan kaiuttimille syötettävä vastaäänisignaali. Laajakaistaista melua vaimennettaessa referenssisensori on akustinen, esimerkiksi mikrofoni. Kapeakaistaisen melun tapauksessa voidaan käyttää pulssianturia tai muuta ei-akustista anturia, joka antaa esimerkiksi melua tuottavan koneen pyörimisnopeuteen verrannollisen tiedon.

Sääto on usein adaptiivinen eli vastamelusignaalin tuottavaa suodinta päivitetään virhemikrofonien mittaaman virhesignaalin perusteella. Yleisin päivitysmenetelmä on LMS-algoritmi, joka perustuu virheen neliön minimointiin (Least-Mean-Square). Aktiivisen äänenhallinnan sovelluksissa algoritmista käytetään FXLMS-versiota (filtered- x LMS), jossa referenssisignaalia suodatetaan kaiuttimen ja virhemikrofonin välisellä siirtofunktiolla. Näin referenssi- ja virhesignaalit saadaan synkronoitua ja algoritmi toimii vakaammin. FXLMS-algoritmia voidaan käyttää sekä laajakaistaisen että kapeakaistaisen melun vaimentamiseen. Käytettäessä ei-akustista referenssisensoria täytyy anturin tuottama pulssijono muuntaa ensin siniaalloksi ja sen kerrannaisiksi. Menetelmää kutsutaan aaltomuotosynteesiksi (Waveform Synthesis Method, WSM). Saatujen sinimuotoisten referenssisignaalien vaihetta ja amplitudia säädetään adaptiivisesti virhesignaalin minimoimiseksi. [3]



Kuva 1. Myötäkytketty laajakaistainen aktiivinen äänenhallintajärjestelmä.

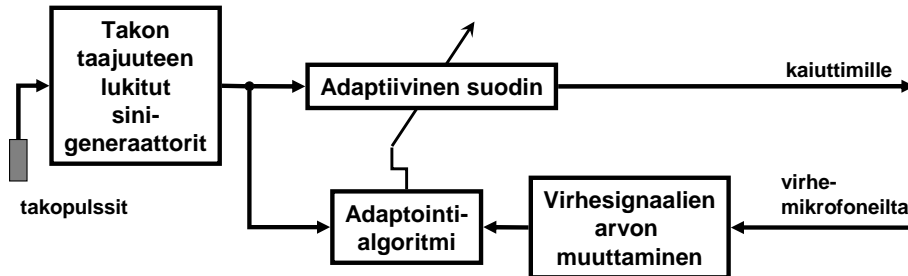


Kuva 2. Myötäkytketty kapeakaistainen aktiivinen äänenhallintajärjestelmä..

4 AKTIIVINEN ÄÄNENHALLINTA JA PSYKOAKUSTIIKKA

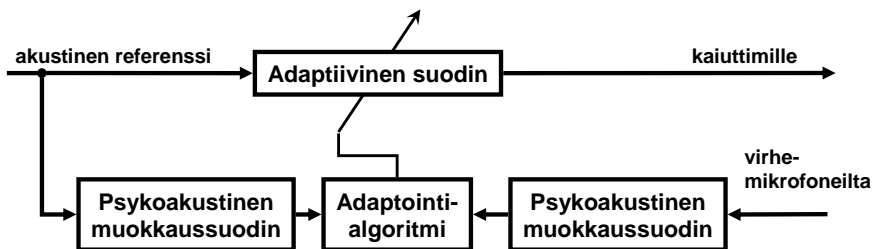
Yksinkertaisimmillaan aktiivisella äänenhallinnalla pyritään vaikuttamaan periodisiin komponentteihin. Tällöin vähennetään tietyn äänen tonaalisuutta ja sitä kautta myös häiritsevyyttä. Yleinen tähän tarkoitukseen käytetty menetelmä on WSM-algoritmi, jossa tarvittavat vastasiniäänit syntesoidaan esimerkiksi moottorin pyörimisnopeuteen tai johonkin muuhun jaksolliseen tietoon perustuen. Yksinkertainen mutta toimiva WSM-algoritmin variantti on ns. tavoitepohjainen menetelmä (Command Based Algorithm) [4]. Siinä

virhesignaaleista vähennetään haluttu tavoitearvo, jolloin järjestelmä minimoidessaan virhettä asettaakin sen tietylle, ennalta asetetulle tasolle. Algoritmi luulee koko ajan minimoivansa virhettä, kun todellisuudessa virhe asettuukin johonkin ennalta asetettuun psykoakustiseen profiiliin. Tällöin tiettyjen ääneksien taso saattaa jopa nousta.



Kuva 3. Myötäkytketty tavoitepohjainen aktiivinen äänenhallintajärjestelmä.

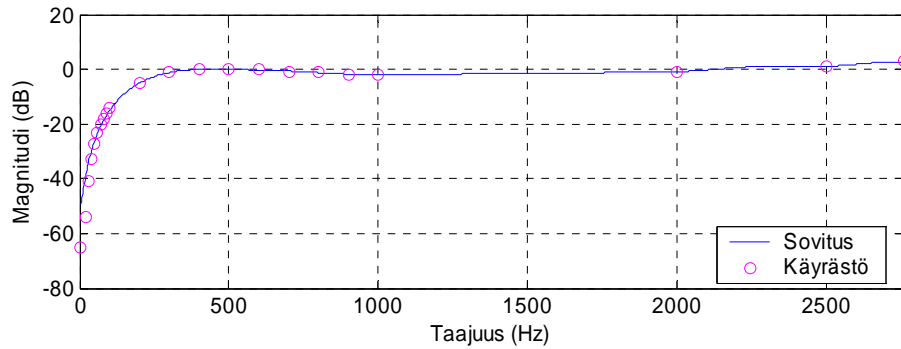
Laajakaistaisessa vaimennuksessa tavallinen LMS-järjestelmä vaimentaa tasoltaan suurimpia taajuuskomponentteja huomioimatta ihmisen kuulon taajuuspainotusta. Haluttaessa vaikuttaa jäännösmelun kuulostavuuteen voidaan käyttää esimerkiksi FELMS-algoritmia (filtered-*e* LMS). FELMS-algoritmi perustuu referenssi- ja virhesignaalin muokkaamiseen. Muokkaamiseen käytetään suodinta, jonka vaste on käänteinen haluttuun jäännösmeluspektriin nähden, kuten kuvassa 4. Käyttämällä kaistanpäästösuodinta voidaan melusta vaimentaa suotimen päästökaistaa vastaava taajuusalue. Jos halutaan minimoida jäännösmelun äänekkyyttä, muokkaussuodin kannattaa suunnitella äänekkyyssäyrästäön mukaisesti. [5,6]



Kuva 4. Myötäkytketty FELMS-algoritmiin perustuva aktiivinen äänenhallintajärjestelmä.

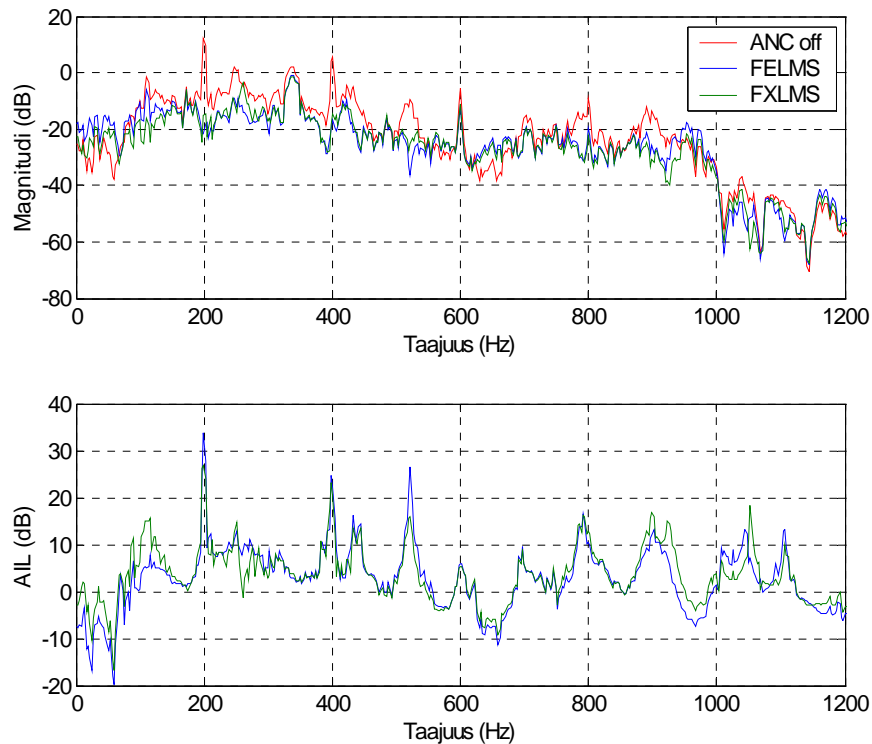
5 SIMULOITU MINIMOINTI

FELMS-algoritmin toimintaa testattiin Simulinkillä. Primääri- ja sekundääriteiden mallintamiseksi mitattiin vastaavat impulssivasteet pienessä kanavassa melulähteeltä ja sekundäärilähteeltä virhesensorille. Kuvassa 5 on esitetty käytetyn muokkaussuotimen taajuusvaste. Suodin on suunniteltu 40 fonin äänekkyyssäyrän mukaisesti. Samaan äänekkyyssäyrään perustuu myös äänenpaineen A-painotus.



Kuva 5. Muokkaussuotimen taajuusvaste.

Simuloinnit tehtiin sekä FELMS-algoritmilla että FXLMS-algoritmilla, jossa muokkaussuodinta ei käytetä. Häiriösignaali oli kohinan ja sinikomponenttien yhdistelmä. Sinikomponenttien taajuudet ovat 200, 400, 600 ja 800 Hz. Tulokset on esitetty kuvassa 6. Ylempi kuva esittää eri tapauksien suhteelliset arvot, ja alempi kuva erotuksen vaimentamattoman ja kummankin vaimennetun tilanteen välillä.



Kuva 6. Tulokset kohinasta ja sinikomponenteista koostuvalla häiriöllä.

Tuloksista laskettiin myös psykoakustiset tunnusluvut, jotka ovat taulukossa 1.

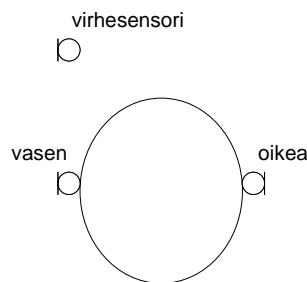
Taulukko 1. Psykoakustiset tunnusluvut kohinasta ja sinikomponenteista koostuvalla häiriöllä.

Tunnusluku	ANC off	FXLMS	FELMS
Äänekkyyys (sone)	28,07	18,49	19,01
Tonaalisuus (tu)	0,46	0,24	0,06
Biasoimaton häiritsevyys (au)	61,70	44,24	44,84

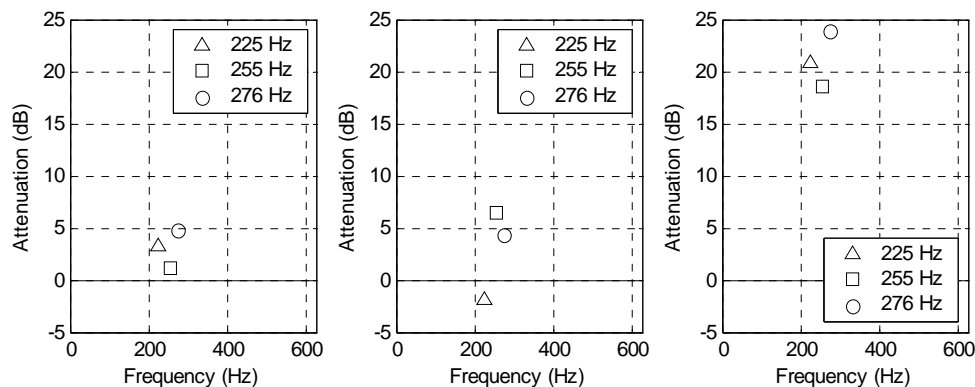
Tulosten perusteella nähdään, että sekä melun kokonaistasoa että äänekkyyttä voidaan pienentää aktiivisilla vaimennusmenetelmillä. FELMS-algoritmin muokkaussuodin suunniteltiin äänekkyyssäyrästä mukaisesti, mutta silti FXLMS-algoritmilla saatiin hieman pienemmät äänekkyyssarvot. Vaimennustuloksissa ei ole juurikaan eroja lukuunottamatta pieniä taajuuksia, joita FELMS-algoritmi ei vaimenna niin tehokkaasti johtuen voimakkaasta ylipäästösuodatuksesta. Toisaalta FELMS-algoritmi pienentää erityisesti tonaalisuutta paremmin kuin FXLMS häiriön koostuessa kohinasta ja sinikomponenteista.

6 KOKEILU TYÖKONEEN OHJAAMOSSA

Esimerkkinä käytetyssä työkoneen ohjaamossa häiritsevät melukomponentit olivat moottorin, hydraulikan ja ilmastoinnin tuottamat äänekset. Ohjaamomelun tonaalisuuden vaimentamiseen käytettiin tavanomaisia aktiivimenetelmiä, jotka vaimentavat suoraan mitattua melua. Heräte oli todellinen käynnin aikainen melu, johon oli lisätty kolme sinikomponenttia siten, että melu vastasi kenttämittauksissa mitattuja tasoja. Säätojärjestelmänä oli WSM-menetelmää käyttävä yksikanavainen säätojärjestelmä. Virhemikrofonilla ja binauraalisilla korvamikrofoneilla (ks. kuva 7) mitatut vaimennukset on esitetty kuvassa 8. Niistä voidaan havaita, että lähes kaikilla taajuuksilla on saatu jonkin verran vaimennusta aikaan (noin 5 dB) lukuun ottamatta 225 Hz oikeassa korvassa. Virhemikrofonilla vaimennus on yli 15 dB.



Kuva 7. Kaaviokuva mikrofonien sijoittelusta.



Kuva 8. Vaimennus todellista moottorimelua vastaavalla signaalilla. Vasemmanpuoleisin kuva: vasen korva, keskimmäinen kuva: oikea korva, oikeanpuoleisin kuva: virhemikrofoni.

Korvamikrofoneilla mitatuista signaalista lasketut psykoakustiset tunnusluvut on esitetty taulukossa 2. Aktiivisen äänenhallinnan käyttö pienentää selvästi havaittua äänen-voimakkuutta ja oikeassa korvassa myös äänen terävyyttä. Häiritsevyys on myös jonkin verran

laskenut ja miellyttävyys kasvanut. Aktiivisella äänenhallinnalla voidaan siis vaikuttaa suoraan havaittavaan ohjaamomiellyttävyyteen.

Taulukko 2. Ohjaamon psykoakustiset tunnussuureet aktiivista äänenhallintaa käytettäessä.

Tunnusluku	ANC off vasen	ANC off oikea	ANC on vasen	ANC on oikea
Äänekkyyks (sone)	22.01	20.92	20.74	19.72
Tonaalisuus (tu)	0.34	0.72	0.38	0.38
Biasoimaton häiritsevyys (au)	50.17	51.19	47.04	42.82

7 YHTEENVETO

Psykoakustisella aktiivisella äänenhallinnalla pystytään mallien ja kokeilujen perusteella vaikuttamaan merkittävästi havaittavaan meluun ja sen häiritsevyyteen. Mittareiden tarkempi arviointi kuuntelukokein on kuitenkin tarpeen mittarien linkittämiseksi paremmin mitattuihin arvoihin.

Muokkaussuotimen suunnittelu on kriittinen kohta FELMS-algoritmia toteutettaessa ja siihen tulee kiinnittää jatkossa erityistä huomiota. Suunnittelussa voitaisiin käyttää esimerkiksi äänenkorkeuteen liittyvää Bark-asteikkoa ja taajuusvarppausmenetelmiä. Tavoitepohjaisissa järjestelmissä taas tavoite eli käytännössä psykoakustinen profiili pitäisi olla hyvin selvillä.

Psykoakustisia algoritmeja käytettäessä on siten tärkeää pystyä käyttämään oikeanlaista, tilanteeseen sopivaa profiilia, kun tarkoituksena ei enää pelkästään ole melun minimointi vaan sen luonteen muuttaminen. Psykoakustisten profiilien määrittely esimerkiksi auto-teollisuudessa on jo pitkällä, mutta vasta vähitellen ne ovat tulossa tärkeiksi muillakin aloilla, kuten esimerkiksi rakennus- ja työkonesektorilla.

LÄHTEET

- 1 KARJALAINEN M, *Kommunikaatioakustiikka*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Signal Processing, Espoo 1999.
- 2 01dB-Stell user manual
- 3 KUO S M & MORGAN D R, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. John Wiley & Sons, New York 1996.
- 4 REES L E & ELLIOTT S J, LMS-based algorithms for automobile engine sound profiling. *Proc. Internoise 2003: 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Seogwipo, Korea, 25-28 August 2003.* , 8pp, 1026-1033
- 5 KUO S M & TSAI J, Residual noise shaping technique for active noise control systems. *J Acoust Soc Am* **95**(1994)3, 1665–1668.
- 6 SOMMERFELDT S D & SAMUELS T O, Incorporation of loudness measures in active noise control. *J Acoust Soc Am* **109**(2001)2, 591–599.