

# PSYKOAKUSTINEN ADAPTIIVINEN EKVALISAATTORI KUULOKEKUUNTELUUN MELUSSA

Jussi Rämö<sup>1</sup>, Vesa Välimäki<sup>1</sup> ja Miikka Tikander<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aalto-yliopisto, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos  
PL 13000, 00076 AALTO  
jussi.ramo@aalto.fi

<sup>2</sup> Nokia Gear  
Keilalahdentie 2–4, PL 226 00045 NOKIA GROUP  
miikka.tikander@nokia.com

## Tiivistelmä

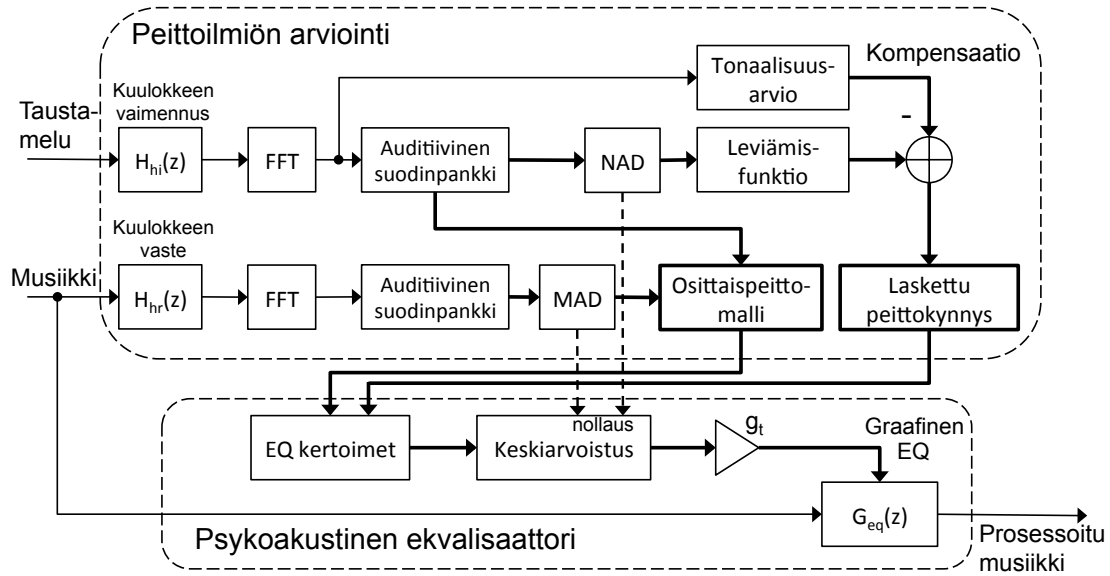
Tässä artikkelissa esitellään ympäristömelun mukaan adaptoituva ekvalisaattori kuulokkeille. Kehittämämme menetelmä arvioi käyttäjän kokeman akustisen peittoilmiön ottaen huomioon kuulokkeiden ominaisuudet, taustamelun ja kuunneltavan musiikin. Järjestelmä hyödyntää psykoakustista peittomallia arvioidessaan mille tasolle musiikin äänenvoimakkuus tulisi säätää, jotta meluisissa olosuhteissa saavutettaisiin sama äänensävy kuin hiljaisuudessakin. Prototyypin testaus osoittaa, että järjestelmän tärkein tehtävä on nostaa musiikki kuuluviin jokaisella Bark-kaistalla. Myös osittaispeittoilmiön kompensoiminen parantaa havaittua äänenlaatua. Ekvalisointi toteutetaan korkea-asteisella graafisella ekvalisaattorilla, joka ei edellytä signaalin jakamista ja yhdistämistä taajuuskaistoittain. Näin minimoidaan musiikkisignaaliin aiheutuvat häiriöt. Ehdottamamme psykoakustinen ekvalisointi säilyttää kohtuullisen äänipainetason, koska se kohdistuu vain niille taajuusalueille, joilla ekvalisointia käytännössä tarvitaan. Näin se pienentää meluannosta verrattuna äänenvoimakkuuden nostamiseen, joka on kuulokkeiden käyttäjien tavallinen tapa reagoida voimakkaaseen taustameluun.

## 1 JOHDANTO

Nykyään melkein kaikilla matkapuhelimilla on mahdollista kuunnella musiikkia, minä vuoksi kuulokkeita käytetään hyvin paljon meluisissa ympäristöissä, kuten esim. busseissa ja junissa<sup>1</sup>. Yleisesti tiedetään, että voimakas melu peittää osia kuultavasta musiikkisignaalista ja näin ollen muuttaa havaittua muusikin äänenväriä. Tätä ilmiötä kutsutaan akustiseksi peittoilmiöksi [1]. Peittokynnys tarkoittaa tasoa, jota heikommat äänet peittyvät kokonaan kuulumattomiin. Osittaispeitolla sen sijaan tarkoitetaan, että äänet eivät peity kokonaan, mutta ne havaitaan hiljaisempina melussa kuin hiljaisuudessa [2].

Tämä artikkeli esittelee reaaliaikaisen toteutuksen adaptiivisesta psykoakustiikkaan perustuvasta kuuloke-ekvalisaattorista, joka huomioi taustamelun ja musiikin spektrit se-

<sup>1</sup>Gartnerin arvion mukaan matkapuhelimia myytiin vuoden 2012 viimeisellä neljänneksellä 428 miljoonaa kappaletta, joista 40% oli älypuhelimia.



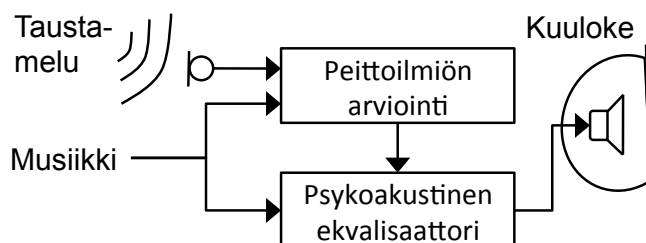
Kuva 1: Peittoilmiön arvioinnin ja psykoakustisen ekvalisaattorin lohkokaavio. Paksut viivat kuvaavat Bark-kaistoihin jaettua signaalia.

kä kuulokkeiden äänentoisto- ja ääneneristyskyvyt. Ekvalisaattorin tavoitteena on kompensoida taustamelun aiheuttama peittoilmiö. Olemme aiemmin tutkineet peittoilmiötä kuulokekuuntelun yhteydessä [3]. Lisäksi yksityiskohtaisempi katsaus tässä julkaisussa esitellyistä menetelmistä on saatavilla pian julkaistavasta artikkelista [4]. Aiemmin meluun perustuvaa musiikin ekvalisointia on tutkittu mm. autoäänentoistossa [5].

## 2 PEITTOILMIÖN ARVIOINTI

Peittoilmiön arvioinnin lohkokaavio on esitetty kuvan 1 ylemmässä osassa. Peittokynnys arvioidaan seuraavalla tavalla [3, 6]. Ensiksi mikrofonilla tallennettu taustamelu suodatetaan kuulokkeen vaimennuskäyrällä  $H_{hi}$ , jotta saadaan arvio korvakäytävän sisään päässeestä melusta. Tämän jälkeen signaali ikkunoidaan, sille lasketaan tehospektri käyttäen lyhytaikaista Fourier-muunnosta (STFT) ja taajuuskaista (Hz) kuvataan Bark-asteikolle. Lopuksi jokaiselle Bark-kaistalle lasketaan keskimääräinen energia. Musiikin energia lasketaan samalla tavalla (kuvan 1 yläosan alempi haara).

Peittoilmiön naapurikaistoille leviämisen kuvaamiseen käytetään leviämiskäyrää. Tässä tapauksessa valittiin epäsymmetrinen leviämiskäyrä, joka ottaa melun äänipainetasen huomioon [7]. Yksittäiset leviämiskäyrät lasketaan yhteen käyttäen summakäyrää, jossa summautumistapaa voidaan säätää. Tällä tavoin saadaan yksi yleinen peittokynnyskäyrä. Tämän jälkeen arvioidaan meluspektrin tasaisuus, josta saadaan johdettua melun tonaalisuus. Melun tonaalisuus määrittelee kuinka tehokkaasti melu peittää musiikkia alleen. Soinnillisen äänen peittovaikutus on riippuvainen taajuudesta ja se on myös selvästi heikompi kuin kohinamaisella melulla. Melun tonaalisuusarvion perusteella saadaan selville kuinka paljon yleistä peittokynnyskäyrää tulee laskea, jotta saadaan selville lopullinen peittokynnyskäyrä.



Kuva 2: Esitellyn järjestelmän lohkokkaavio.

Tähän tarkoitukseen sopivaa osittaispeittomallia ei löytynyt kirjallisuudesta, joten sellainen tehtiin kuuntelukokeiden perusteella. Kuuntelukokeissa käytettiin erilaisia luonnolliselta kuulostavia synteettisiä ääniä ja meluja [3].

Kuulokkeiden ominaisuudet selvitettiin mittaamalla kuulokkeiden taajuusvasteet ja ympäristön äänien vaimennus käyttäen keinopäätä. Mittaustulosten perusteella kuulokkeen taajuusvasteelle ja vaimennukselle luotiin suotimet  $H_{hr}(z)$  ja  $H_{hi}(z)$ . Suotimet ovat FIR-suotimia asteluvuilla 100 ja 200.

### 3 PSYKOAKUSTINEN EKVALISAATTORI

Tässä paperissa esitelty psykoakustinen ekvalisaattori tarvitsee toimiakseen kuulokkeet ja monomikrofonin (kts. kuva 2). Tällaisia ovat mm. monet nykyaikaiset stereo hands-free kuulokkeet, jotka tulevat puhelimen mukana. Ideaalisesti musiikin äänipainetasoa tulisi nostaa siten, että melulla ei ole merkitystä musiikin havaittuun tonaaliseen tasapainoon. Käytännössä kuitenkin on tärkeintä nostaa kuulumattomat komponentit musiikista kuuluviin. Toisin sanoen peittokynnyksen alapuolella olevat taajuuskaistat tulisi nostaa peittokynnyksen yläpuolelle. Vieläkin parempia tuloksia saavutetaan kun vahvistetaan myös sellaisia komponentteja, jotka ovat vain osittain peittyneet melun alle.

Ekvalisaattorin toimintavaiheet ovat seuraavanlaiset: *kertoimien laskenta*, joka hyödyntää laskettuja peittokynnyksen ja osittaispeiton arvioita, *kertoimien keskiarvoistus*, joka tasoittaa ekvalisaattorien kertoimien vaihtelua ajassa, sekä *graafinen ekvalisaattori*, jonka avulla musiikkisignaali ekvalisoidaan vastaamaan järjestelmän laskemaa tasoa (kts. kuva 1 alempi osa).

#### 3.1 Kertoimien laskenta

Kertoimien laskenta -lohko käyttää peittokynnyksinformaatiota ja arvioi millä Bark-kaistoilla musiikki on peittokynnyksen alapuolella. Tämän jälkeen niille kaistoille jotka ovat kokonaan peittyneet asetetaan kertoimet, millä ne saadaan taas kuuluviin. Kuunteluiden perusteella huomattiin, että kun peittyneet komponentit nostetaan 2 dB peittokynnyksen yläpuolelle, esiin nousevat komponentit parantavat musiikin havaittua taajuusvastetta reilusti.

Tässä lohkossa käytetään hyväksi myös laskettua osittaispeittoinformaatiota, josta voidaan laskea kuinka paljon osittain peitossa olevia taajuuskaistoja tulisi vahvistaa. Lisäk-

si digitaalisesta musiikkisignaalista lasketaan jäljellä oleva äänenvoimakkuuden säätövara, joka rajoittaa vahvistuksen määrän mikä on toteutettavissa ilman että musiikkisignaali säröytyy.

### 3.2 Kertoimien keskiarvoistus

Kun ekvalisaattorin kertoimissa tapahtuu nopeasti suuria muutoksia, se voi johtaa kuultavaan musiikin "pumppaamiseen". Tämän vuoksi järjestelmään lisättiin kertoimien keskiarvoistus -lohko rajoittamaan liian suuria kertoimien vaihteluita. Kuunteluiden perusteella todettiin, että keskiarvo voidaan ottaa melko pitkältä aikaväliltä (n. 10 s), sillä ihmisten kuulo adaptoituu suhteellisen hitaasti. Kuulo ei myöskään ole kovin herkkä nopeille meluärsykkeille musiikkia kuunnellessa, varsinkaan jos kuunneltava kappale on entuudestaan tuttu. Kuitenkin kun kerkiarvoa kasvatetaan niin adaptaationopeus laskee, joten keskiarvoistus on kompromissi äänenlaadun ja adaptaationopeuden välillä.

Adaptaationopeuden kannalta tilanne, jossa käyttäjä siirtyy nopeasti meluisesta ympäristöstä hiljaiseen ympäristöön, esim. kadulta sisätiloihin, täytyy käsitellä erikoistapauksena, jottei meluisaan ympäristöön adaptoitunut ekvalisaattori jää päälle hiljaisempaan ympäristöön siirryttäessä. Toinen samankaltainen erikoistilanne syntyy kun musiikissa tulee hiljaisia kohtia tai kappale vaihtuu. Kertoimien laskenta -lohkon tulkinta hiljaisesta kohdasta musiikissa on että musiikki on peittokynnyksen alapuolella ja sitä täytyy vahvistaa, vaikka näin ei tietenkään ole. Nämä kaksi erikoistapausta on ratkaistu lisäämällä algoritmiin meluilmaisain (noise activity detection, NAD) ja musiikki-ilmaisain (music activity detection, MAD), jotka nollaavat ekvalisaattorin kertoimet, jos musiikki tai melu laskee alle tietyn kynnsarvon (kts. kuva 1).

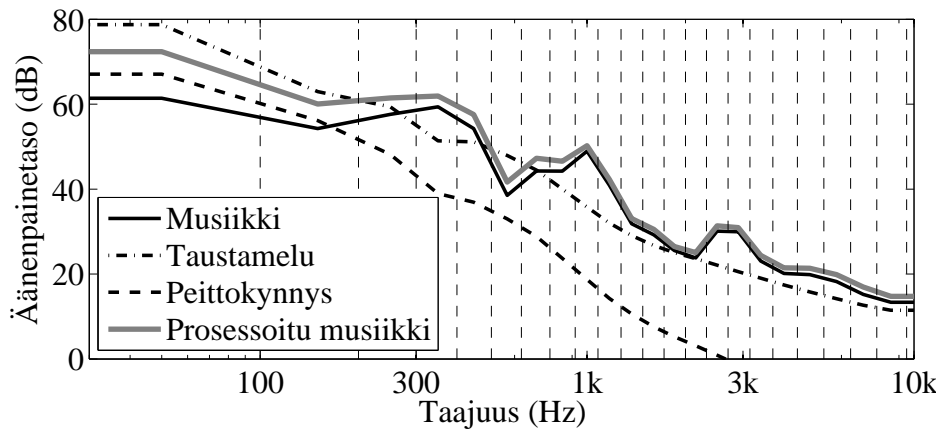
### 3.3 Graafinen ekvalisaattori

Järjestelmässä käytetään korkea-asteista graafista ekvalisaattoria musiikin vahvistukseen, joka perustuu Orfanidoksen [8] sekä Holtersin ja Zölzerin [9] esittelemiін suodintarkaisuihin. Korkea-asteisen ekvalisaattorin etuna on se, että jokaisen kaistan vahvistus voidaan säätää lähes riippumattomasti naapurikaistoihin nähden. Kyseinen graafinen ekvalisaattori koostuu neljännen asteen osioista, joita voidaan kytkeä peräkkäin.

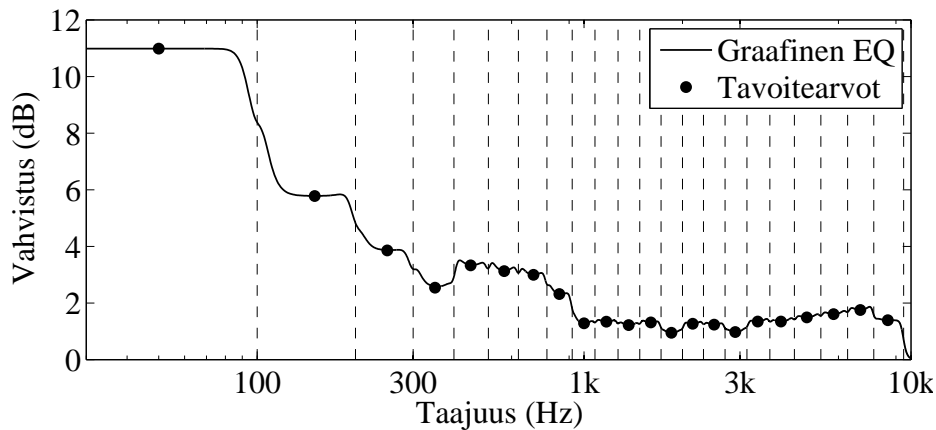
Pääasiallinen hyöty graafisen ekvalisaattorin käytöstä tässä järjestelmässä saavutetaan siinä ettei signaalia tarvitse hajottaa ensin suodintankilla Bark-kaistoihin ja sen jälkeen summata takaisin koko kaistan signaaliksi. Prosessoimaton musiikki voidaan syöttää graafisen ekvalisaattorin läpi, jota vain ohjataan psykoakustisten mallien mukaisesti.

## 4 TULOKSET

Esitellystä psykoakustisesta ekvalisaattorista tehtiin reaaliaikainen toteutus käyttäen Matlabia ja Playreciä. Kuva 3 esittää yhden sekunnin kehyksen analyysiä, missä musta käyrä on musiikin tehospektri, pistekatkoviiva on taustamelun tehospektri, katkoviviiva on laskettu peittokynnys ja harmaa viiva on prosessoidun musiikin spektri. Käytetty taustamelu oli simuloitua bussimelua.



Kuva 3: Taustamelun spektri ja siitä laskettu peittokynnys, musiikin spektri ja prosessoidun musiikin spektri.



Kuva 4: Kuuloon perustuvan ekvalisaattorin vaste sekä sen tavoitearvot jokaiselle Bark-kaistalle.

Kuva 4 esittää kuvan 3 perusteella lasketun graafisen ekvalisaattorin vasteen (yhtenäinen käyrä) ja sen tavoitearvot (mustat pisteet). Kuten kuvasta 4 nähdään musiikkia vahvistetaan pääasiassa matalilla taajuuksilla (<1 kHz). Tämä on yleinen tapaus sillä tyypillisesti taustamelussa on eniten juuri matalia taajuuksia ja lisäksi kuulokkeiden vaimennus on heikoimmillaan matalilla taajuuksilla. Myös kuunteluiden perusteella voidaan todeta, että ekvalisaattori voitaisiin käytännössä rajoittaa toimimaan vain ensimmäisillä yhdeksällä Bark-kaistalla (20–1080 Hz) ja silti saavuttaa hyviä tuloksia. Lisätuna kaistan rajoituksesta on laskennallisen kuorman väheneminen sekä häiriöiden ("pumppaaminen") väheneminen yli 1 kHz taajuuksilta, missä kuulo on herkimmillään.

Yksi tärkeimmistä hyödyistä psykoakustisessa ekvalisoinnissa on äänipainetason säilyminen kohtuullisilla tasoilla vaikka musiikin voimakkuutta nostetaan, varsinkin verrattuna normaaliin tapaan kompensoida musiikin peittymistä säätämällä äänenvoimakkuutta kovemmalle. Esimerkkinä kuvissa 3 ja 4 esitetty vahvistus lisää äänipainetasoa noin 2,5 dB. Jos matalille taajuuksille halutaan sama vahvistus käyttäen äänenvoimakkuuden säädintä, äänipainetaso kasvaa 11 dB.

## 5 YHTEENVETO

Tämä artikkeli esitteli uuden kuuloaistiin ja psykoakustiikkaan perustuvan ekvalisaattorin mobiiliin kuulokekäyttöön, joka perustuu auditorisiin peittomalleihin. Järjestelmä arvioi musiikin ja melun tason korvakäytävässä ottaen kuulokkeiden ominaisuudet huomioon. Musiikin ekvalisointi on toteutettu korkea-asteisella graafisella ekvalisaattorilla, joka mahdollistaa vahvistuksen säätämisen lähes riippumattomasti jokaisella Bark-kaistalla. Esitelty ekvalisaattori säilyttää kohtuullisen äänipainetasoa verrattuna tyypilliseen äänenvoimakkuuden nostoon, koska vahvistus voidaan kohdistaa vain sinne missä se on tarpeen. Esimerkitapauksessa kuuloon perustuva ekvalisaattori nosti äänipainetasoa alle 3 dB vaikka suurin vahvistus yksittäisellä taajuuskaistalla oli 11 dB. Lisäksi järjestelmä adaptoituu erilaiseen musiikkiin, taustameluun ja kuulokkeisiin.

## VIITTEET

- [1] GLASBERG B R & MOORE B C J, Development and evaluation of a model for prediction the audibility of time-varying sounds in the presence of background sounds, *J. Audio Eng. Soc.*, **53**(2005) 10, 906–918.
- [2] ZWICKER E & FASTL H, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [3] RÄMÖ J, VÄLIMÄKI V, ALANKO M, & TIKANDER M, Perceptual frequency response simulator for music in noisy environments, in *Proc. AES 45th International Conference*, Helsinki, Finland, March 2012.
- [4] RÄMÖ J, VÄLIMÄKI V, & TIKANDER M, Perceptual headphone equalization for mitigation of ambient noise, in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Vancouver, Canada, May 2013.
- [5] CHRISTOPH M, Noise dependent equalization control, in *AES 48th International Conference*, Munich, Germany, September 2012.
- [6] JOHNSTON J D, Transform coding of audio signals using perceptual noise criteria, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, **6**(1988) 2, 314–323.
- [7] BOSI M & GOLDBERG R E, *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*, Kluwer, 2003.
- [8] ORFANIDIS S J, High-order digital parametric equalizer design, *J. Audio Eng. Soc.*, **53**(2005) 11, 1026–1046.
- [9] HOLTERS M & ZÖLZER U, Graphic equalizer design using higher-order recursive filters, in *Proc. Int. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-06)*, pp. 37–40, September 2006.