

MENETELMÄ NAPPIKUULOKKEIDEN AIHEUTTAMAN MELUALTISTUKSEN MITTAAMISEEN TÄRYKALVON ÄÄNENPAINETASON PERUSTEELLA

Sami Oksanen¹, Marko Hiipakka¹, Ville Sivonen²

¹ Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
PL 13000, 00076 AALTO
sami.oksanen@aalto.fi, marko.hiipakka@aalto.fi

² Cochlear Nordic AB
Myyrmäentie 2B, 01600 Vantaa
vsivonen@cochlear.com

1 JOHDANTO

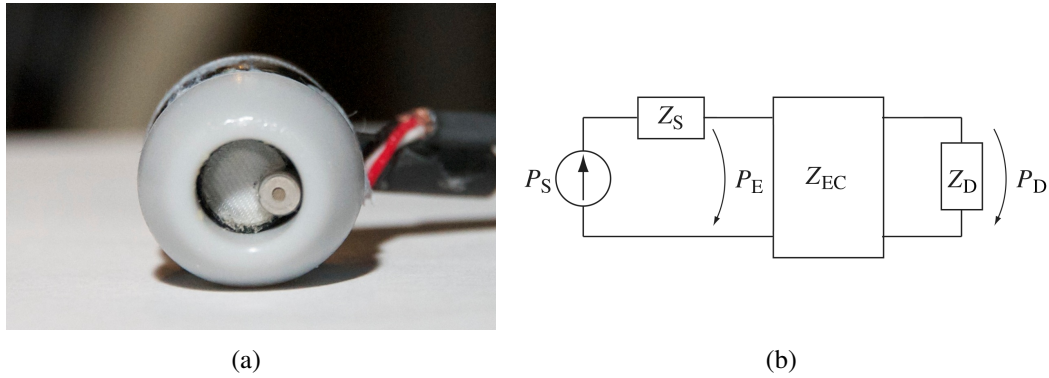
Laki velvoittaa toimenpiteisiin työperäisen melualtistuksen seuraamiseksi ja kuulonsuojelun toteuttamiseksi [1]. Toisaalta vapaa-ajan melualtistus on alati kasvavaa, kun meluisat harrastukset yleistyvät. Kannettavien musiikkisoittimien suosio on kasvanut jatkuvasti ja nykyään on tyypillistä, että esimerkiksi matkapuhelimet on varustettu mediasoittimilla ja nappikuulokkeilla. Kyseisillä laitteilla on mahdollista toistaa musiikkia äänenpainetasoilla, jotka voivat olla haitallisia kuulolle. Nappikuulokkeilla tapahtuvan musiikin kuuntelun aiheuttaman meluannoksen arvioiminen on kuitenkin haastavaa korvan yksilöllisten ominaisuuksien vuoksi [2].

Binauraalisessa äänentoistossa kuulokkein sekä useissa audiometrisissä sovelluksissa on tärkeää tietää tarkka äänenpainetaso henkilön tärykalvolla. Äänenpaineen akustinen mittaaminen tärykalvon läheisyydestä on kuitenkin teknisesti vaikeaa mikrofoniin koon ja sen sijoittamisen aiheuttamien haasteiden vuoksi. Tässä tutkimuksessa esitellään menetelmä, jossa mitataan äänenpaine ja arvioidaan tilavuusnopeus korvakäytävällä. Mittauksissa käytettäviä tulppakuulokkeita räätälöitiin siten, että niiden kaiutin- ja mikrofonin viereen asennettiin Knowles FG-23329 -pienoismikrofonit [kuvassa 1(a)]. Äänenpaineen taajuusvasteet korvakäytävän suulla mitattiin logaritmisella sinipyyhkäisytekniikalla [3]. Mittausten perusteella voidaan arvioida korvakäytävän yksilöllistä taajuusvastetta sekä äänenpainetasoa tärykalvolla.

2 MENETELMÄ

Korvakäytävä voidaan mallintaa tiettyyn tarkkuuteen asti akustisena siirtolinjana [4, 5]. Tässä tutkimuksessa mallinnettiin korvakäytävän lisäksi siihen liitetty nappikuuloke, jolloin koko mallinnettava sähköakustinen piiri on kuvassa 1(b) esitetyn kaltainen.

Kokonaisenergiatiheys (potentiaalienergia + kineettinen energia) siirtolinjassa on vakio kaikissa pisteissä, jos siirtolinjan etenemiskerroin on imaginäärinen ($\gamma = i\beta$, missä β



Kuva 1: (a) Mittauksissa käytetty nappikuuloke, johon on asennettu Knowles FG-23329 -pienoismikrofoni. (b) Yksinkertaistettu malli, joka koostuu kuulokkeesta (painelähde P_S ja sisäinen impedanssi Z_S), korvakäytävästä ja tärykalvosta. P_E on paine korvakäytävän suulla, P_D on paine tärykalvolla, Z_{EC} kuvaa korvakäytävää siirtolinjana ja Z_D on tärykalvon impedanssi.

on reaalinen). Näin ollen,

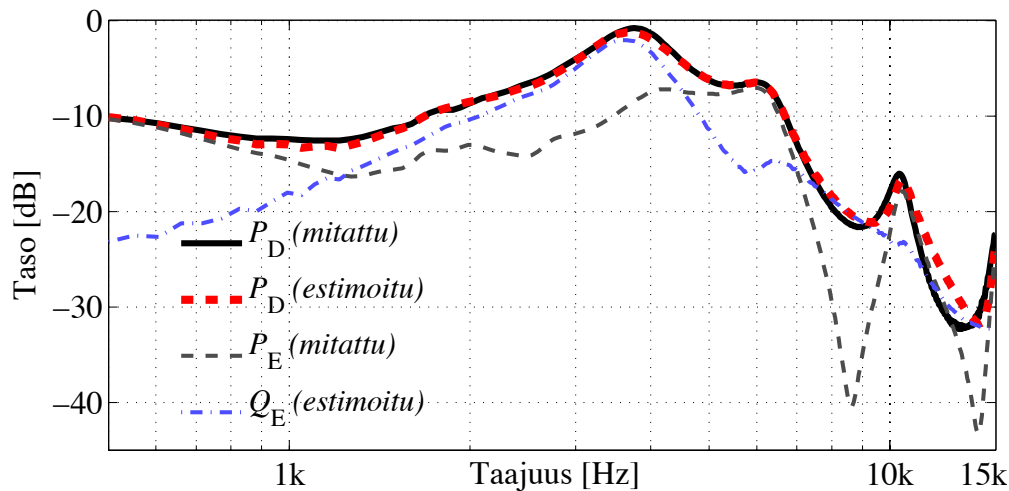
$$|P_1|^2 + |Z_W Q_1|^2 = |P_2|^2 + |Z_W Q_2|^2, \quad (1)$$

missä Z_W on aaltoimpedanssi, P_1 and P_2 ovat paineet eri pisteissä ja Q_1 and Q_2 ovat tilavuusnopeuksia. Jos siirtolinja on päätetty kovahkolla pinnalla, tilavuusnopeus siirtolinjan päässä pienenee pintaa lähestyttäessä. Olettamalla tilavuusnopeus tärykalvolla pieneksi, voidaan paine tärykalvolla estimoida:

$$P_{D,est} = \sqrt{|P_E|^2 + |Z_W Q_E|^2}, \quad (2)$$

missä P_E on paine käytävän suulla, Z_W on aaltoimpedanssi ja Q_E on tilavuusnopeus käytävän suulla [6]. Kuulokkeet mallinnettiin Théveninin lähdemallina tekniikalla, joka on esitetty aiemmassa artikkelissa [5]. Kaavaa (2) voidaan käyttää tärykalvon paineen estimoimiseen tietämättä käytävän pituutta tai tarkkaa muotoa [6]. Tilavuusnopeus ja aaltoimpedanssi on kuitenkin tunnettava tärykalvon paineen estimoimiseksi. Tässä tutkimuksessa tilavuusnopeus saatiin kaavalla $Q_E = \frac{P_S - P_E}{Z_S}$, missä P_S on mallinnettu painelähde, P_E on mitattu paine käytävän suulla ja Z_S on mallinnettu lähteen sisäinen impedanssi. Arvioitu aaltoimpedanssi käytävän suulla on $Z_W = \rho c / A$, missä ρ ilman tiheys, c äänen nopeus ja A korvakäytävän pinta-ala.

Menetelmän validoimista varten tehtiin mittauksia korvakäytäväsimulaattorilla sekä kuuden koehenkilön korvakäytävissä. Kuulokkeen taajuusvasteet mitattiin sekä korvakäytävän suulta kuulokkeiden mikrofoneilla että tärykalvolta simulaattorin tärykalvomikrofonilla ja koehenkilöiden tärykalvolle asennetulla pienuismikrofonilla. Koehenkilöiden tärykalvomittauksille tehtiin suurilla taajuuksilla korjaus, jolla kompensoitiin mikrofoniin ja tärykalvon välisen etäisyyden aiheuttama kuoppa taajuusvasteessa [7]. Edellä esitetyllä estimointimenetelmällä saatuja taajuusvasteita verrattiin tärykalvolta mitattuihin vasteisiin, jolloin voitiin todeta menetelmän toimivuus. Yhden koehenkilön (vasen korva) tulokset on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2: Mitattu paine P_D (mitattu) tärykalvolla, kaavalla (2) estimoitu paine P_D (estimoitu) tärykalvolla sekä mitattu paine P_E (mitattu) ja estimoitu tilavuusnopeus Q_E (estimoitu) korvakäytävän suulla.

3 MITTAUKSET JA KUUNTELUKOE

Menetelmän soveltuvuutta testattiin nappikuulokkeiden aiheuttaman melualtistuksen arvioinnissa laboratorio-olosuhteissa. Mittauksissa käytettiin tutkimusta varten valmistettuja mikrofoniillisia kuulokkeita, joiden avulla äänenpainetaso mitattiin koehenkilöiden kuunnellessa musiikkia. Kokeessa määritettiin äänenpainetasot kahdella kuuntelutasolla, jotka olivat "normaali" ja "äänekäs".

Testissä koehenkilöiden tehtävänä oli säätää ääninäytteen äänenvoimakkuus vastaamaan vaihtoehtoisesti joko normaalia tai äänekkästä kuuntelutasoa. Tässä tapauksessa normaalilla kuuntelutasolla tarkoitetaan tilannetta, jossa koehenkilö kykenee kuuntelemaan musiikkia pidemmän ajanjakson. Äänekkäällä kuuntelussa koehenkilön tuli säätää äänenvoimakkuus vastaamaan tasoa, jota kytetään kuuntelemaan lyhytkestoisesti (n. 5 min). Kokeessa selvitettiin myös taustamelun vaikutusta valittuun kuunteluvoimakkuuteen simuloimalla melua toistaen vaaleanpunaista kohinaa kaiuttimilla. Musiikkinäytteinä käytettiin kahta ennalta valittua näytettä ja kunkin koehenkilön itse valitsemaansa näytettä. Näiden lisäksi käytettiin kahta spektriltään muokattua kohinanäytettä, jotka muokattiin vastaamaan klassisen ja laulumusiikin pitkäaikaisspektriä. Ääninäytteiden kesto oli 15 s ja koehenkilöt kuuntelivat ääninäytteet binauraalisesti.

Mittaustilana toimi Akustiikan laboratorion iso kaiuton huone. Taustamelua tuotettiin neljällä timanttimuodostelmaan asennetulla aktiivikaiuttimella (Genelec 8030A). Kaiuttimien etäisyys kuuntelupisteestä vaihteli välillä 2,4–2,7 metriä ja etäisyyseroista aiheutuva tasonvaihtelu kalibroitiin mittausohjelman avulla. Mittauksia varten laadittiin Matlab-ohjelmisto, jonka avulla ääninäytteet soitettiin koehenkilöille ja suoritettiin samanaikainen tasonmittaus. Mittauksissa käytettiin MOTU Traveler-mk3 -äänikorttia, joka oli kytkettyä mittaustietokoneen FireWire-väylään. Mittausdata tallennettiin reaaliajassa käyttäen Matlab-ympäristöön kehitettyä Playrec-ohjelmistoa¹. Koehenkilöt

¹<http://www.playrec.co.uk>

säätivät nappikuulokkeiden äänenvoimakkuutta graafisen käyttöliittymän avulla. Varsinainen mittaus suoritettiin toistamalla musiikinäyte koehenkilön asettamalla tasolla nappikuulokkeista ja mittaamalla vastaava signaali kuulokkeisiin asennetuilla mikrofoneilla.

Mittauslaitteisto kalibroitiin käyttäen B&K 4192 -mittamikrofonia, joka oli kytketty B&K 2669 -esivahvistimen kautta B&K Nexus -mittausvahvistimeen. Mittalaitteiston tasokalibrointiin käytettiin B&K 4231 -mikrofonikalibraattoria, jonka tuottama 94 dB SPL -tasoinen signaali tallennettiin referenssiksi. Taustamelun taso säädettiin vastaamaan tasoa $75 \pm 0,2$ dB(A) SPL.

Korvakäytävässä tehdyt mittaukset muutettiin vertailukelpoisiksi kahdessa vaiheessa: Aluksi korvakäytävässä mitatut äänenpainetasot muutettiin vastaamaan tärykalvolla valitsevia tasoja yllä esitetyllä tavalla. Tämän jälkeen tärykalvolle mallinnetut äänenpainetasot muutettiin ISO 11904-1 -standardissa [8] määritetyllä tavalla vastaamaan vapaassa ja diffuusissa kentässä mitattavia äänenpainetasoja.

4 TULOKSET

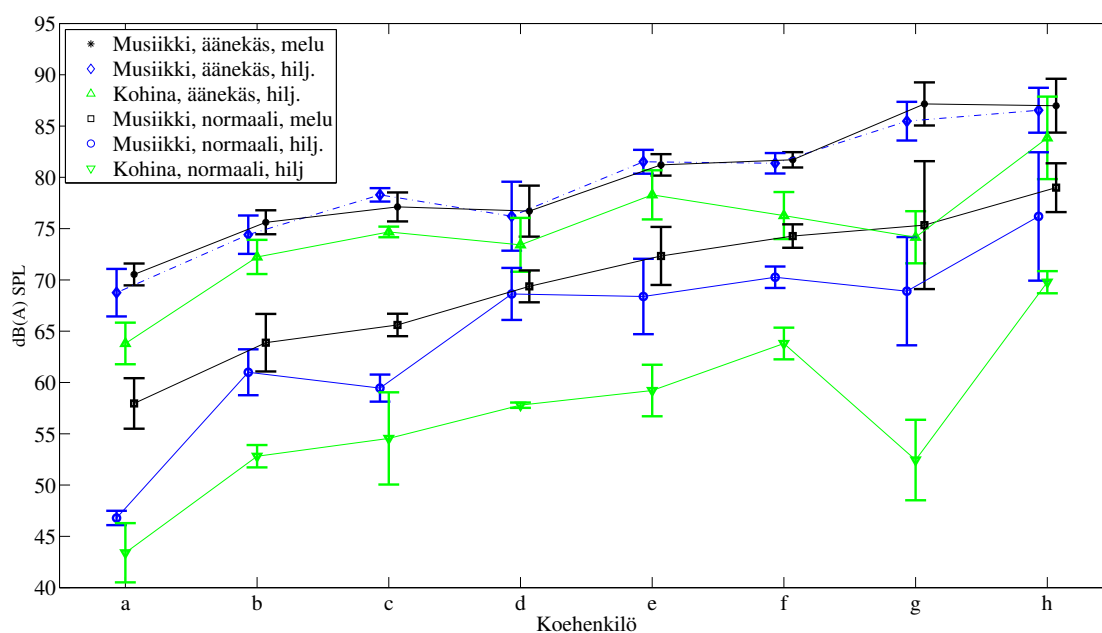
Mitatut äänenpainetasot vaihtelivat melko paljon koehenkilöiden välillä. Kuvassa 3 on esitetty mitatut äänipainetasot vapaan kentän tasoja vastaavina testityypeittäin eri koehenkilöille. Äänenpaineteiden keskiarvot on merkitty symbolilla ja keskihajonta on merkitty viiksillä. Kaikkien koehenkilöiden kuunteluvoimakkuuden keskiarvo ja keskihajonta normaalissa kuuntelussa yhden oli 64 ± 10 dB(A) SPL ja taustamelussa 68 ± 8 dB(A) SPL. Äänekkäässä kuuntelussa keskiarvo ja keskihajonta oli 78 ± 6 dB(A) SPL, jolloin taustamelulla ei ollut vaikutusta koehenkilöiden asettamiin äänenvoimakkuuksiin. Kohinasignaaleilla oli selkeä ero normaalin kuuntelun (54 ± 10 dB(A) SPL) ja äänekkään kuuntelun (72 ± 5 dB(A) SPL) välillä.

5 DISKUSSIO

Tutkimuksen koehenkilöiden käyttämät äänenpainetasot eivät aiheuttaneet välitöntä kuulovaurion riskiä verrattuna turvallisena pidettyn $L_{eq,8h}=85$ dB(A) referenssiin [1]. Sen sijaan kokeessa mitatut yksittäiset huipputasot voivat aiheuttaa pysyvän kuulovaurion, mikäli altistus on riittävän pitkäkestoista, tai henkilön kokonaisaltistusta nostaa jatkuva työskentely meluisissa olosuhteissa. Kokeessa havaittiin myös, että taustamelu [n. 75 dB(A) SPL] nosti mitattuja äänenpainetasoja normaalitasolla tapahtuvassa kuuntelussa, kun taas äänekkään kuuntelun tasoihin taustamelulla ei ollut vaikutusta. Lisäksi huomattiin, että käytetyllä musiikkityypillä ei ollut vaikutusta koehenkilöiden käyttämiin äänenpainetasoihin. Mittaukset osoittavat, että menetelmän tulokset ovat tarkkoja aina 12 kHz:iin asti.

KIITOKSET

Suomen Akatemia ja Nokian Säätiö ovat tukeneet tätä tutkimusta. The research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) / ERC grant agreement n° [240453].



Kuva 3: Mitatut äänenpaineet vapaan kentän tasoja vastaavina koehenkilöittäin eri testitilanteille. Keskiarvot on merkitty symbolein ja keskihajonnat viiksillä.

VIITTEET

- [1] TYÖSUOJELUHALLINTO, *Työmelu*, Työsuojeluhallinto, Tampere, 2007.
- [2] OKSANEN S, Studies on the noise exposure caused by the personal stereo systems, Technical report, Aalto university, 2011.
- [3] FARINA A, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, in *Proc. 108th Audio Engineering Society Convention*, Feb 2000.
- [4] HAMMERSHØI D & MØLLER H, Sound transmission to and within the human ear canal, *J. Acoust. Soc. Am.*, (1996).
- [5] HIIPAKKA M, TIKANDER M, & KARJALAINEN M, Modeling of external ear acoustics for insert headphone usage, *Journal of the Audio Engineering Society*, **58**(2010) 4, 269–281.
- [6] HIIPAKKA M, KARJALAINEN M, & PULKKI V, Estimating pressure at eardrum with pressure-velocity measurement from ear canal entrance, in *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, Oct 2009.
- [7] HIIPAKKA M & PULKKI V, HRTF:n mittaaminen - suljetulla vai avoimella korvakäytävällä?, in *Proc. Akustiikkapäivät*, Toukokuu 2011.
- [8] ISO 11904-1, *Acoustics – Determination of sound immission from sound sources placed close to the ear – Part 1: Technique using a microphone in a real ear (MIRE technique)*, ISO, Geneva, Switzerland, 2000.