

# TULPPAKUULOKKEIDEN AKUSTIIKKA

**Jussi Rämö<sup>1)</sup>, Mikko Alanko<sup>1)</sup>, Miikka Tikander<sup>2)</sup> ja Vesa Välimäki<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu, signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos  
PL 13000, 00076 AALTO  
etunimi.sukunimi@aalto.fi

<sup>2)</sup> Nokia Gear  
Itämerenkatu 11-13, 00180 Helsinki  
etunimi.sukunimi@nokia.com

## 1 JOHDANTO

Kuulokkeiden käyttö ihmisten arkielämässä on lisääntynyt valtavasti lähiaikoina. Varsinkin pienet kannettavat kuulokkeet ovat yleistyneet rajähdysmäisellä tavalla kannettavien multimedialaitteiden ja älypuhelimien suosion myötä<sup>1</sup>. Valitettavasti näiden laitteiden mukana tulevat kuulokkeet ovat usein heikkolaatuisia nappikuulokkeita, jotka eivät sovi käytettäväksi meluisissa ympäristöissä. Ihmisten olisi hyvä ymmärtää tämä ja tutustua erilaisiin kuulokkeisiin, jotta he osaisivat valita oikeanlaiset kuulokkeet kuhunkin käyttötarkoitukseen. Oikein valitut kuulokkeet voivat tarjota hyvinkin laadukkaan kuuntelukokemuksen, jopa verrattuna kaiutinkuunteluun.

Kuulokekuuntelu on hyvin erityyppistä verrattuna normaaliin avoimilla korvilla kuuntelemiseen. Ensinnäkin kaikki ympäristön sekä kuuntelijan kehon, kuten hartioiden ja pään, vaikutukset ääneen yleensä menetetään, lukuunottamatta binauraalista materiaalia. Eri-tyyppiset kuulokkeet myös muuttavat ulkokorvan akustiikkaa eri tavoin, mikä täytyy huomioida kuulokesuunnittelussa. Tämän lisäksi kaikilla ihmisillä on yksilöllinen ruumiinrakenne. Nämä seikat tekevät kuulokkeiden suunnittelun hyvin haastavaksi.

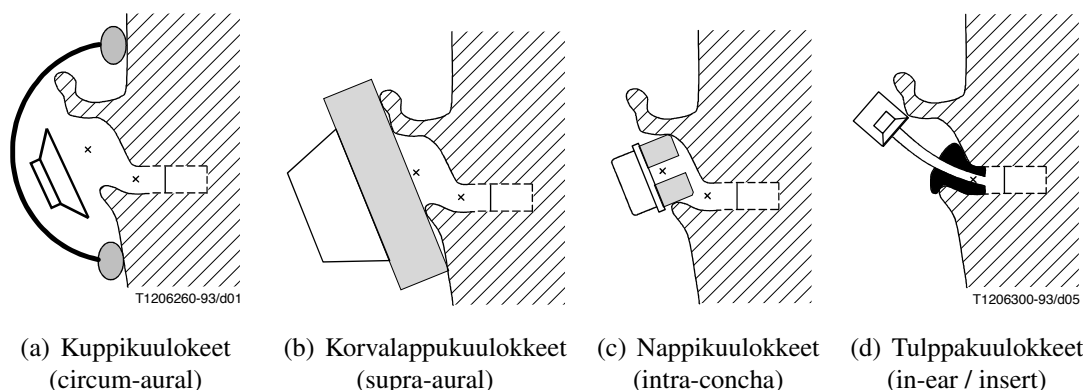
## 2 KUULOKKEIDEN AKUSTIIKKA

Kuulokkeet voidaan jakaa karkeasti neljään eri kuuloketyyppiin: korvan ympärille asetuvat kuppikuulokkeet (circum-aural), korvalehden päälle asetuvat korvalappukuulokkeet (supra-aural), korvakäytävän suulle asetuvat nappikuulokkeet (intra-concha) ja korvakäytävään asetuvat tulppakuulokkeet (in-ear / insert). Kuvassa 1 on esitettyä ITU-T Rec. P.57. suosituksen mukaiset kuuloketyypit [1]. Erilaisilla kuuloketyypeillä on omat etunsa ja haittansa. Kuunteluympäristö luo myös usein omat vaatimuksensa kuulokkeille. Esimerkiksi taustamelu, kuulokkeiden koko ja kannettavuus, niiden laatu tai jopa ulkonäölliset ominaisuudet voivat vaikuttaa kuulokkeiden valintaan.

Kuulokkeita on tutkittu melko paljon kaiuttimien ohella. Tutkimus on kuitenkin lähes poikkeuksetta kohdistunut kuppikuulokkeisiin ja korvalappukuulokkeisiin (esim. [2],

---

<sup>1</sup>Älypuhelimia myytiin Gartnerin arvion mukaan vuonna 2009 noin 172 miljoonaa. Apple ilmoitti syyskuussa 2009, että iPodia on myyty yli 220 miljoonaa kappaletta.



Kuva 1: Erilaiset kuuloketyypit ITU-T Rec. P.57. suosituksen mukaan (muokattu kuva lähteestä [1]).

[3] ja [4]) sekä nappikuulokkeisiin (esim. [5] ja [6]), kun taas tulppakuulokkeisiin kohdistunut tutkimus on ollut hyvin vähäistä (esim. [7] ja [8]). Omassa tutkimuksessamme erityisen mielenkiinnon kohteena ovat lähiaikoina olleet juuri tulppakuulokkeet. Niiden etuihin kuuluvat erittäin hyvä ympäristömelun vaimennus ja hyvä äänenlaatu varsinkin pienillä taajuuksilla. Nämä ominaisuudet yhdessä pienen ja kevyen rakenteen kanssa tekevät tulppakuulokkeista erittäin käytännölliset kuulokkeet mm. käytettäväksi kannettavien musiikkilaitteiden ja puhelinten kanssa.

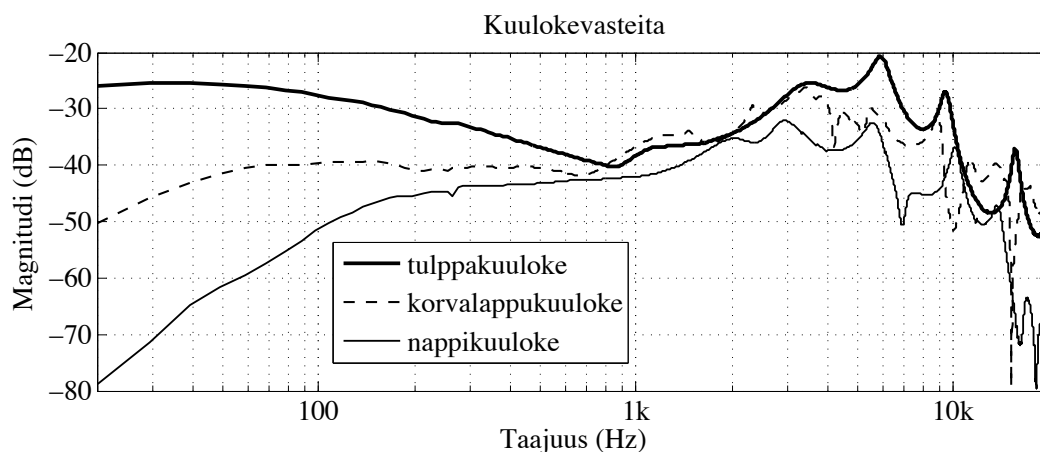
## 2.1 Kuulokevasteet

Tulppakuulokkeet muuttavat ulkokorvan akustiikkaa hyvinkin paljon. Korvakäytävä on periaatteessa lyhyt lieriömäinen, toisesta päästä avoin ja toisesta päästä suljettu, putki. Avoin korvakäytävä käyttäytyy kuten neljännesaaltoresonaattori, jonka ensimmäinen resonanssi on tyypillisesti 2 - 4 kHz taajuudella. Kun korvakäytävä suljetaan tiiviillä tulppakuulokkella, sen käyttäytyminen muuttuu neljännesaaltoresonaattorista puoliaaltoresonaattoriksi, jonka ensimmäinen resonanssi sijoittuu tyypillisesti 5 - 10 kHz alueelle. Korvakäytävän pituus lyhentyy, kun kuuloke asetetaan korvakäytävään, mikä puolestaan vaikuttaa resonanssitaajuuteen.

Kuulokesuunnittelun lähtökohtana on yleensä saada aikaiseksi mahdollisimman luonnollinen ääni, joka tarkoittaa, että kuulokekuuntelun tulisi vastata avoimilla korvilla koettua kuuntelukokemusta. Eräs määritelmä hi-fi-kuulokkeille on, että kuulokekuuntelukokemuksen ei tulisi millään tavoin erota alkuperäisestä kuuntelukokemuksesta [3]. Jotta tähän tavoitteeseen päästäisiin, se edellyttää, että kuunneltava materiaali on nauhoitettu binauraalisesti. Kuitenkin materiaali jota yleensä kuunnellaan kuulokkeilla on tavallista stereokuunteluun tarkoitettua musiikkia. Tällöin ongelmaksi (hi-fi määritelmän kannalta) muodostuu musiikin lokalisoituminen pään sisälle. Tähän ongelmaan on olemassa ratkaisu, jonka periaatteena on yhdistää eri kanavien signaaleja ekvalisoituna kumpaankin korvaan [10, 9]. Käytännönläheisempi mukautettu määritelmä on, että kuulokekuuntelukokemus tulisi olla erittäin hyvä ja miellyttävä. Tästä kuitenkin seuraa se, että kuulokkeille ei varsinaisesti ole määritelty tavoitevastetta, ainakaan niin yksiselitteisesti kuten kaiuttimille.

Tulppakuulokkeiden tapauksessa lähtökohtana luonnollisen äänen luomiselle on muutuneen ulkokorvan akustiikan korjaaminen. Toisin sanoen kuulokevasteen pitäisi ainakin luoda tärykalvolle puuttuva neljännesaaltoresonanssitaajuus 2 - 4 kHz alueelle ja kumota 5 - 10 kHz alueelle muodostuva ylimääräinen puoliaaltoresonanssitaajuus.

Kuvassa 2 nähdään kolmen erityyppisen kuulokkeen taajuusvasteet. Paksulla yhtenäisellä viivalla on kuvattu tulppakuulokkeen vaste, katkoviivalla on kuvattu korvalappukuulokkeen vaste ja ohuella yhtenäisellä viivalla on kuvattu nappikuulokkeen vaste. Vasteet on mitattu syöttämällä logaritminen sinipyyhkäisy [11] kuulokkeeseen, kuulokkeen ollessa HATS:in (malli 4128C, Type 3.3 earsimulator) keinokorvassa. Vasteet siis edustavat kuulokkeiden tuottamaa äänenpainetta tärykalvolla. Kuten kuvasta 2 nähdään, tulppakuulokkeilla on selvästi runsain bassotoisto, kun taas nappikuulokkeilla bassotoisto on vaimentunut erittäin paljon.



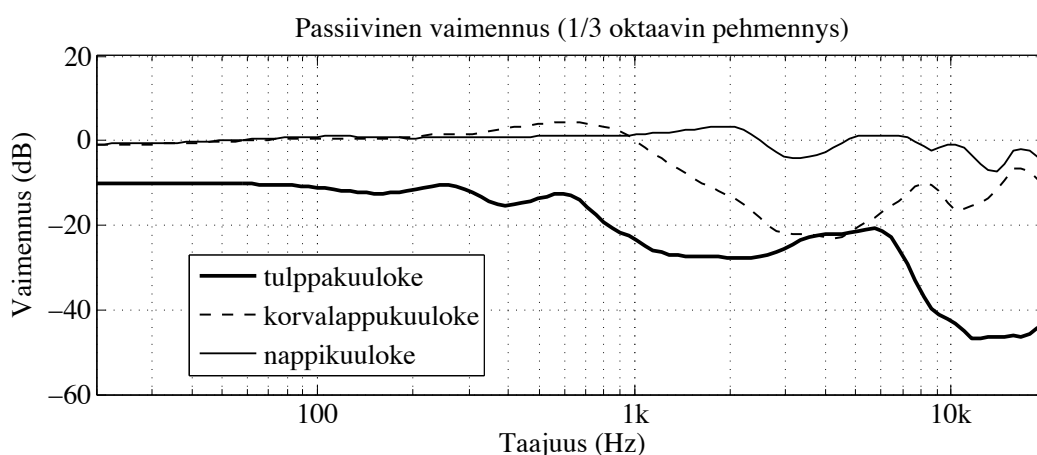
Kuva 2: Erityyppisten kuulokkeiden taajuusvasteita.

## 2.2 Passiivinen vaimennus ja vuoto

Kuulokkeista riippuen taustamelu pääsee vuotamaan kuulokkeiden läpi sekä kuulokkeiden reunoilta korvakäytävään. Tämän lisäksi vuotoa tapahtuu myös toiseen suuntaan, korvakäytävästä kuuntelijan ympäristöön. Tyypillisesti ääni vuotaa kuulokkeen pehmusteen ja ihon välistä, luujohtumalla tai kuulokkeen mekaanisena värähdysliikkeenä.

Tulppakuulokkeissa on yleensä hyvin istuvat silikoniset tulpat, jotka asetetaan osittain korvakäytävän sisään. Siitä huolimatta tulpan ja ihon välistä pääsee jonkin verran ulkoisia ääniä korvakäytävään, erityisesti jos kuulokkeet eivät istu käyttäjän korvaan oikein. Kuulokkeissa voi myös olla bassoputkia ja muita rakenteellisia ominaisuuksia, jotka päästävät äänet vuotamaan kuulokkeen lävitse. Lisäksi kuulokkeet siirtävät mekaanisesti ääntä sekä sisältä ulospäin että ulkoa sisällepäin. Kun tulppakuulokkeet sopivat hyvin käyttäjän korvaan ja ne on asetettu kunnolla, ne tarjoavat huikean passiivisen vaimennuksen ulkoisille äänille. Passiivinen vaimennus on voimakkaasti taajuusriippuvaa ja parhaiten kuulokkeen läpäisevät matala- ja keskitaajuiset äänet.

Kuvassa 3 on esitettyinä kolmen kuulokkeen mitatut passiiviset vaimennuskäyrät. Mitatut kuulokkeet ovat samat kuin kuvassa 2 käytetyt kuulokkeet. Vaimennuskäyrät mitattiin kuunteluhuoneessa HATS:in (malli 4128C) avulla, siten että neljästä Genelecin kaiuttimesta ja yhdestä subwooferista soitettiin vaaleanpunaista kohinaa mikä nauhoitettiin ensiksi HATS:in avoimella korvalla ja tämän jälkeen sama signaali nauhoitettiin, kun kuuloke oli asetettuna HATS:in korvalle. Näiden kahden vasteen erotuksena saadaan kuvan 3 käyrät, jotka kuvaavat kuulokkeiden passiivista vaimennusta desibeleinä taajuuden funktiona. Kuten kuvasta nähdään, tulppakuulokkeiden vaimennus on aivan ylivoimaista verrattuna korvalappu- ja nappikuulokkeisiin<sup>2</sup>. Korvalappu- ja nappikuulokkeet jopa vahvistavat taustamelua tietyillä taajuuksilla. Korvalappukuulokkeet alkavat kuitenkin vaimentaa yli 1 kHz taajuisia ääniä, kun taas nappikuulokkeet eivät käytännössä vaimenna taustamelua juuri lainkaan.



Kuva 3: Erityyppisten kuulokkeiden passiivisia vaimennuskäyriä.

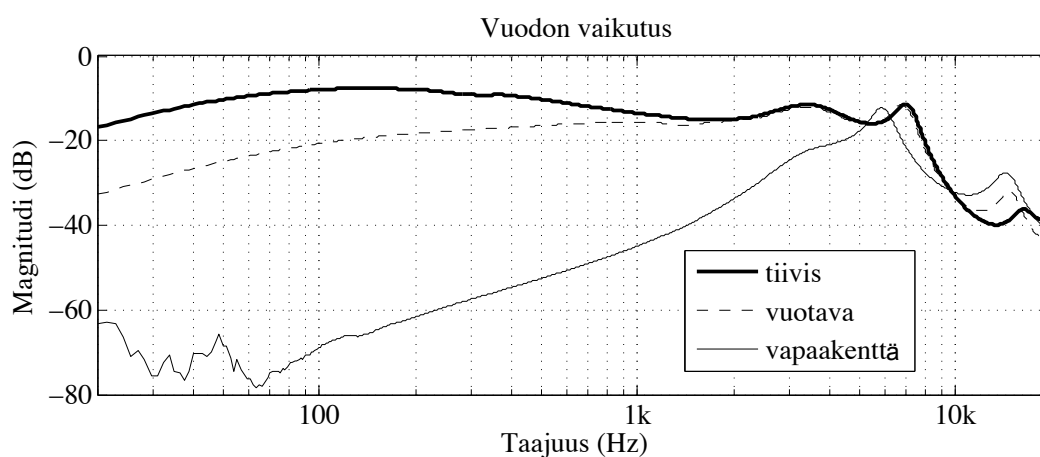
### 2.3 Paineammioilmiö

Kaiutinkuuntelussa kaiuttimien pitää tuottaa äänikenttä koko kuuntelutilaan. Kuulokekuuntelussa, varsinkin tulppakuulokkeiden tapauksessa, tilavuus johon kaiutinelementin pitää tuottaa äänikenttä on hyvin pieni ja pieneen tilavuuteen on helppo tuottaa suuriakin äänipainetasoja. Tulppakuulokkeiden tapauksessa, jolloin tilavuus kuulokkeen ja tärykalvon välillä on vain noin  $1 \text{ cm}^3$ , kuuloke on vielä yleensä hyvin tiiviisti asetettu. Kun vuotoja ei ole, niin matalilla- ja keskitaajuuksilla, missä aallonpituus on suuri verrattuna kaiutinelementtiin, äänenpaine on samassa vaiheessa kaiutinelementin poikkeaman kanssa sekä tasaisesti levinnyt koko tilavuuteen [3]. Kuulokkeen tiiviiden ansiosta pienelläkin kaiutinelementillä saadaan näin helposti tuotettua matalia taajuuksia. Tästä syystä tulppakuulokkeilla on ylivoimainen bassontoistokyky nappikuulokkeisiin verrattuna. Paineammioperiaatteesta seuraa myös se, että tulppakuulokkeen täytyy istua hyvin käyttäjän korvaan, jotta hyvä bassotoisto on mahdollista.

Kuva 4 esittää tulppakuulokkeen mitattua taajuusvastetta tiukalla sovituksella (yhtenäinen viiva) ja vuotavalla sovituksella (katkoviiva) sekä vapaassa kentässä (ohut yhte-

<sup>2</sup>Tulppakuulokkeen mitattu vaimennus on matalilla taajuuksilla (alle 400 Hz) hieman liioiteltua, koska kuuloke asettuu HATS:in keinokorvaan tiukemmin kuin oikeaan korvaan.

näinen viiva). Taajuusvasteet on mitattu lyhyen putken avulla, johon sekä kuuloke että mittausmikrofoni sopivat tiiviisti [7]. Huomaa, että lyhyen putken, n. 7 mm, vuoksi taajuusvasteissa ei näy putken (korvakäytävän) resonansseja lainkaan, koska ensimmäinen puolialtorezonanssitaajuus on yli 20 kHz:ssä [7]. Kuvasta nähdään selkeästi kuinka matalat taajuudet vaimenevat, kun kuuloke on asetettu vuotavasti mittausputkeen (katkoviiva). Vuotavan sovituksen tapauksessa matalat taajuudet vaimenevat, koska ne pääsevät vuotamaan kuulokkeen tulpan ja putken pinnan välistä ulos putkesta. Toisin sanoen, matalat taajuudet tärykalvolla vaimenevat kun tilavuus mihin kaiutinelementti joutuu tuottamaan äänenpainetta kasvaa. Tämä huomataan hyvin myös vapaakenttävasteesta, jossa kuulokkeen bassotoisto on käytännössä katsoen olematonta (alle 100 Hz:n taajuudella näkyvät vaihtelut ovat jo taustakohinaa). Kuvasta nähdään hyvin kuinka ilmatiivis painekammio voi vahvistaa vapaassa kentässä mitattua äänenpainetta 100 Hz:n taajuudella jopa 60 dB ja vielä 1 kHz:n taajuudellakin vahvistus voi olla jopa 30 dB.



Kuva 4: Tulppakuulokkeiden asettelun (tiivis / vuotava) vaikutus taajuusvasteeseen.

## 2.4 Okluusio

Okluusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa oma ääni kuulostaa kumealta ja tynnyrimäiseltä, kun korvat ovat kokonaan tai osittain tukitut. Ilmiötä on helppo kokeilla laittamalla sormet korviin ja puhumalla matalalla äänellä. Okluusio on tunnettu ongelma esimerkiksi kuulolaiteteollisuudelle, mutta sama ongelma esiintyy myös käytettäessä tulppakuulokkeita. Okluusioilmiö syntyy kun oma ääni siirtyy luujohtumisen avulla korvakäytävään. Normaalissa tilanteessa, kun korvat ovat avoinna, luujohtumisen kuljettamat matalat taajuudet pääsevät poistumaan korvakäytävästä, mutta kun korvat ovat tukitut, oman puheen matalat taajuudet jäävät loukkuun korvakäytävään, eivätkä pääse sieltä pois (vrt. painekammioilmiö, pienet liikkeet tuottavat suuren äänenpaineen).

Okluusio tyypillisesti havaitaan ärsyttävänä ja luonnottomana ilmiönä. Oman puheen lisäksi okluusioilmiö voimistaa kaikkia mekaanisia ääniä, jotka kulkevat korvakäytävään kuulokkeita pitkin, kuten esimerkiksi johtojen rapinat. Myös kävelystä johtuva töminä saattaa kuulostaa häiritsevältä okluusion vuoksi. Okluusiota voidaan vähentää tekemällä kuulokkeisiin aukkoja, jolloin pienemmillä taajuuksilla korvakäytävä käyttäytyy avoimen korvakäytävän tavoin ja näin äänet pääsevät pois korvakäytävästä. Tämä kuitenkin

heikentää sekä kuulokkeen passiivista vaimennusta että painekammioperiaatteesta saatavia bassotoiston hyötyjä.

### 3 YHTEENVETO

Tulppakuulokkeilla on erinomainen suorituskyky varsinkin pienillä taajuuksilla. Tämän lisäksi ne vaimentavat taustamelua huomattavasti enemmän kuin muun tyyppiset kuulokkeet. Hyvän vaimennuksen ansiosta musiikkia voidaan kuunnella hiljempaa, mikä puolestaan vähentää korvien rasitusta ja kuulovaurion riskiä. Haittapuolena tulppakuulokkeiden käytössä voidaan pitää okluusiota, joka aiheutuu kun tulppakuuloke tukkii korvakäytävän tiiviisti. Okluusion aiheuttamat haitat ovat tavallisessa musiikin kuuntelemissa kuitenkin vähäiset.

### VIITTEET

- [1] ITU-T, *Recommendation P.57, SERIES P: TELEPHONE TRANSMISSION QUALITY, Objective measuring apparatus - Artificial Ears*, International Telecommunication Union, 08/96.
- [2] MØLLER H, JENSEN C, HAMMERSHØI D, & SØRENSEN M, Design criteria for headphones, *J. Audio Eng. Soc.*, **43**(1995) 4, 218–232.
- [3] POLDY C, *Loudspeaker and Headphone Handbook, Chapter 14 – Headphones*, Focal Press, 3rd edition, 2001.
- [4] POLDY C, Headphone fundamentals, *AES 120th, Paris*, (2006).
- [5] BLANCHARD L & AGERKVIST F T, Concha headphones and their coupling to the ear, *AES 126th Convention, Munich, Germany*, (2009).
- [6] TIKANDER M, Modeling the attenuation of a loosely-fit insert headphone for augmented reality audio, *AES 30th International Conference, Saariselkä, Finland*, (2007).
- [7] RÄMÖ J, *Evaluation of an Augmented Reality Audio Headset and Mixer*, Master's thesis, Helsinki University of Technology, Faculty of Electronics, Communication and Automation, Department of Signal Processing and Acoustics, 2009.
- [8] HIIPAKKA M, TIKANDER M, & KARJALAINEN M, Modeling of external ear acoustics for insert headphone usage, *J. Audio Eng. Soc.*, **58**(2010) 4, 269–281.
- [9] LIITOLA T, *Headphone Sound Externalization*, Master's thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, 2006.
- [10] KIRKEBY O, A balanced stereo widening network for headphones, *AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio*, (2002).
- [11] FARINA A, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, *AES 108th Convention, Paris*, (2000).