

HUONEAKUSTIIKAN MALLINNUS JA AURALISAATIO - KATSAUS NYKYTUTKIMUKSEEN

Tapio Lokki ja Lauri Savioja

Teknillinen korkeakoulu
Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio
PL 5400, 02015 TKK
Tapio.Lokki@hut.fi, Lauri.Savioja@hut.fi

1 JOHDANTO

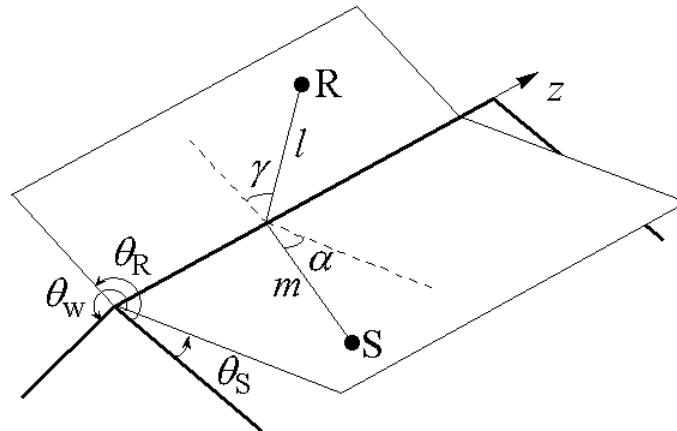
Suljettujen tilojen akustiikkaa on viime aikoina tutkittu maassamme Tekesin ja yritysten rahoittaman Tila-akustiikan hallinta (TAKU) -projektin puitteissa. TAKU:n eri osaprojekteissa on keskitytty lähinnä yksittäisten, hyvinkin yksityiskohtaisten, ongelmien ratkomiseen. Tällaisia ongelmia ovat mm. traktorin ohjaamon akustiikka, pienten taajuuksien käyttäytyminen ja hallinta äänitarkkaamoissa, materiaalien absorptio-ominaisuuksien mittausten menetelmät ja sähköinen harjoitussali sinfoniaorkesterille. Näiden lisäksi TAKUn projekteissa BINAssa (binauraalinen salimallinnus ja mittaus) on toistaiseksi keskitytty Suomen suurimpien konserttisalien mittaamiseen ja tällä hetkellä olemme kehittelemässä mittausdatan analyysimenetelmiä sekä huoneakustiikan uusia mallinnusmenetelmiä.

Tässä artikkelissa kerromme muutamista uusista parannuksista jo ennalta tunnettuihin huoneakustiikan mallinnusmenetelmiin. Huoneakustiikan mallinnusmenetelmiä esittelimme vuoden 1997 Akustiikkapäivillä [1] ja vuonna 1999 [2] keskityimme hieman tarkemmin erääseen varsin kiinnostavaan menetelmään, nimeltään aaltojohtoverkkoon.

2 DIFFRAKTION MALLINNUS KUVALÄHDEMENETELMÄSSÄ

Kuvalähdemenetelmä [3,4] on eräs sädeakustiikkaan perustuva menetelmä, jolla pystytään mallintamaan tarkasti suoran äänen ja varhaisten heijastusten (ja seinämateriaalien) vaikutus äänikenttään. Menetelmää käytetään mallinnusohjelmistoissa tutkittaessa varhaisten heijastusten jakaumaa niin ajallisesti kuin spatiaalisestikin. Kuvalähdemenetelmää käytetään usein myös auralisoitaessa mallinnustuloksia, koska menetelmällä saadaan tarkka tieto varhaisista heijastuksista ja jälkikäikunta voidaan luoda tilastollisilla menetelmillä.

Sädemenetelmien perustana on oletus äänisäteistä, toisin sanoen äänen aallonpituudeksi oletetaan nolla. Tällöin kaikki aaltoliikkeestä aiheutuvat ilmiöt, esim. diffraktio, jäävät mallintamatta. Svensson et al. [5] esittivät kuitenkin ratkaisun, jonka avulla diffraktiokomponentit voidaan laskea ideaalisen jäykille särmiille. Tämä aika-alueen menetelmä soveltuu käytettäväksi nimenomaan kuvalähdemenetelmän kanssa, koska menetelmä antaa vain diffraktiokomponentit ja käyttää lähtötietonaan samaa geometriaa kuin kuvalähdemenetelmä. Menetelmän huonoja puolia ovat verrattain kompleksinen laskenta-algoritmi, varsinkin jos mallinnetun tilan geometria on monimutkainen. Toinen puute mallissa on, että se toimii vain ideaalisen jäykille särmiille. Näistä rajoituksista huolimatta malli toimii hyvin kohtuullisen yksinkertaisella geometrialla ja antaa oleellisen lisän sädepohjaisiin menetelmiin simuloitaessa varhaisen äänikentän käyttäytymistä.



Kuva 1. Esimerkkisärmä, jossa S on äänilähde ja R vastaanottopiste.

Diffraktiokomponenttien laskenta toteutetaan seuraavasti. Kuvan 1 ääntä diffraktoiva särmä jaetaan pieniin elementteihin, joiden kunkin vaikutus lopputulokseen lasketaan kaavan (1) avulla. Kunkin elementti antaa impulssin, jonka viive määräytyy etäisyyksien m ja l mukaan ja amplitudi etäisyyksien m , l ja suuntaavuusfunktion β mukaan. Suuntaavuusfunktion $\beta(\alpha, \gamma, \theta_S, \theta_R)$ voi annettujen kulmien perusteella laskea kaavalla (2).

$$h(t) = -\frac{v}{4\pi} \int_{z^1}^{z^2} \delta\left(t - \frac{m+l}{c}\right) \left(\frac{\beta}{ml}\right) dz \quad (1)$$

missä t on aika, $v = \pi/\theta_w^1$ on särmäindeksi ja $\delta(t)$ on yksikköimpulssi. Suuntaavuusfunktio voidaan laskea seuraavalla kombinaatiolla $\beta = \beta_{++} + \beta_{+-} + \beta_{-+} + \beta_{--}$, jossa

$$\beta_{\pm\pm} = \frac{\sin[v(\pi \pm \theta_S \pm \theta_R)]}{\cosh\left(v \cosh^{-1} \frac{1 + \sin\alpha \sin\gamma}{\cos\alpha \cos\gamma}\right) - \cos[v(\pi \pm \theta_S \pm \theta_R)]} \quad (2)$$

3 INTERPOLOITU KOLMIULOTTEINEN AALTOJOHTOVERKKO

Aaltojohtoverkko on aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuva mallinnusmenetelmä [2]. Tärkeimpänä uutena tekniikkana siihen liittyen voidaan pitää interpoloitua kolmiulotteista aaltojohtoverkkoa.

Perustaltaan aaltojohtoverkko on hyvin lähellä matemaattista aika-alueen differenssimenetelmää. Alkuperäisen menetelmän pahin puute on siinä ilmenevä suuntariippuva dispersio. Käytännössä tämä siis tarkoittaa sitä, että ääni etenee eri nopeuksilla eri suuntiin, ja lisäksi äänen nopeus väliaineessa on myös taajuuden funktio. Tämähän ei vastaa fysikaalista todellisuutta, kun puhutaan äänen etenemisestä ilmassa. Interpoloitu aaltojohtoverkko on kehitetty tämän dispersion suuntariippuvuuden poistamiseen. Toinen menetelmä, jolla dispersion vaikutusta voidaan pienentää on taajuusvarppaus.

Alkuperäisessä kolmiulotteisessa aaltojohtoverkossa suhteellinen dispersiovirhe on pahimmillaan 23.6 %, kun taas interpoloidussa ja varpatussa rakenteessa vastaava virhe on pystytty pienentämään 0.78%:iin [7]. Tämä siis tarkoittaa sitä, että simuloitaessa jotain rakennetta

simulointivasteessa näkyvät resonanssitaajuudet ovat alle prosentin sisällä tarkasta resonanssitaajuudesta.

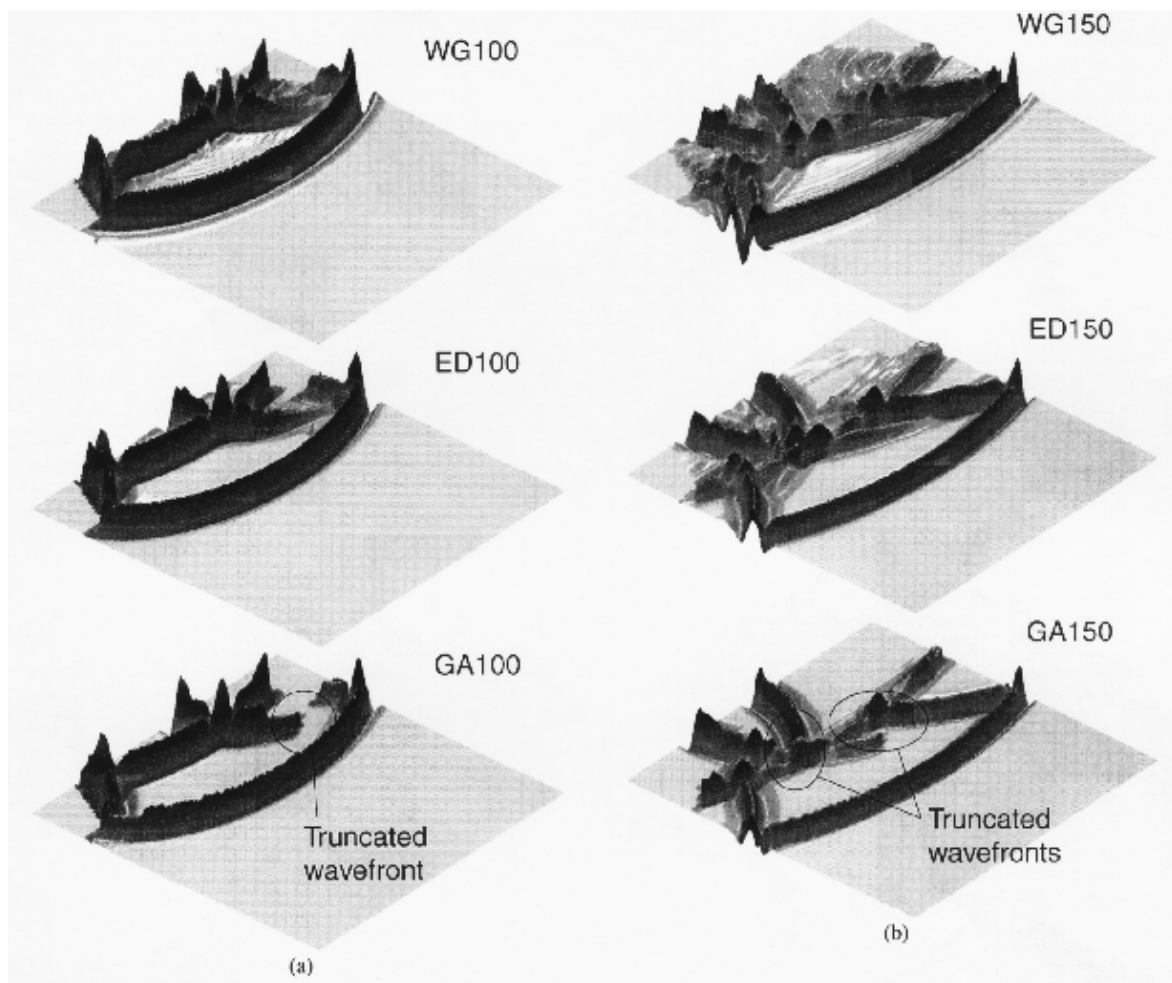
Todellisten kolmiulotteisten tilojen simuloinnissa käytännön ongelmaksi muodostuu helposti suuri laskentakapasiteetin tarve. Tämän hetkistä tilannetta voidaan tutkia seuraavan esimerkin avulla. Simuloidaan tilaa, jonka koko on 5m x 10m x 3m, ja sinne on tehty suorakulmainen hila 20cm jaotuksella. Tällöin verkon kooksi tulee $25 \times 50 \times 15 = 18\,750$ solmua. Yhdellä päivityskerralla kullekin solmulle tarvitaan 27 yhteenlaskua ja kolme kertolaskua, yhteensä 30 operaatiota. Tällöin kullekin aika-askeleelle tarvitaan 562 500 laskutoimitusta. Valittu 20cm jaotus vastaa 3kHz päivitystaajuutta, jolloinka yhtä sekuntia kohden tulee noin 1687 miljoona laskutoimitusta. Tällaisen simuloinnin tulokset ovat käyttökelpoisia korkeintaan yhteen neljäsosaan päivitystaajuudesta, eli tässä tapauksessa 750 Hz asti. Sovelluksesta riippuen voidaan joutua rajoittumaan vielä tämänkin alapuolelle. Yhteenvetona voisi kuitenkin todeta, että kohtuullisen kokoisissa tiloissa alle 500 Hz taajuudet pystytään helposti simuloimaan aaltojohtoverkon avulla.

Edellä mainituista rajoituksista huolimatta interpoloitu kolmiulotteinen aaltojohtoverkko on erittäin lupaava huoneakustiikan mallinnusmenetelmä. Laskenta-algoritmi on kohtuullisen yksinkertainen ja antaa tarkkoja tuloksia pienillä taajuuksilla, jossa sädeakustiikkaan pohjautuvat menetelmät eivät toimi lainkaan. Lisäksi simuloinnin ylärajataajuutta on helppo nostaa tulevaisuudessa, kun koneiden laskentakapasiteetti kasvaa.

Tärkein jatkokehityksen kohde aaltojohtoverkoissa on tällä hetkellä reunojen mallintaminen. Nykytiedolla pystytään ainoastaan reunaehto, jossa heijastuserroin $r = -1$ toteuttamaan täydellisesti, ja kaikki muut reunaehdot ovat aina jotenkin epätäydellisiä. Yllättäen kaikkein vaikeinta on ollut täysin kaiuttoman seinän toteuttaminen.

4 ESIMERKKISIMULAATIOT YKSINKERTAISESTA SALIMALLISTA

Kuvassa 2 on esimerkkisimulaatio yksinkertaisesta konserttisalimallista. Sali on kenkälaatikko, jossa yhdelle seinälle on upotettu esiintymislava. Kuvassa 2 on visualisoitu kaksi ajanhetkeä (100 ja 150 näytettä, näytteenottotaajuus oli 2400 Hz) simuloituna eri menetelmillä. Kuvat on siis tehty siten, että on laskettu impulssivasteet kaikissa tason pisteissä ja sitten poimittu noista vasteista 100. ja 150. näyte. Alimmaiseta kuvat on laskettu pelkällä kuvalähdemenetelmällä ja niistä näkyy hyvin, kuinka aaltorintamat katkeavat, mikä ei ole fysikaalisesti perusteltua. Aaltorintaman katkeaminen johtuu siitä, että kuvalähde ei enää ole näkyvä katkeamiskohdan jälkeisiin kuuntelupisteisiin. Keskimmaisissa kuvissa kuvalähdemenetelmään on lisätty diffraktiokomponentit ja katkenneita aaltorintamia ei enää esiinny, vaan aaltorintamat vaimevat vähitellen siirrettäessä kuuntelupistettä yhä kauemmaksi lavan nurkan taakse. Ylimmät kuvat ovat tuotettu interpoloidulla kolmiulotteisella aaltojohtoverkolla ja ne ovat lähes identtiset keskimmaisten kuvien kanssa. Ylimmissä kuvissa on kuitenkin hieman enemmän aaltorintamia, mikä johtuu siitä, että kuvalähdemenetelmän ja diffraktion yhdistelmässä laskettiin vain ensimmäisen ja toisen kertaluvun heijastukset kun taas interpoloitu aaltojohtoverkko antaa automaattisesti kaikki mahdolliset heijastukset.



Kuva 2. Esimerkkisimulaatio yksinkertaisesta konserttisalin mallista. Kuvat ovat ajanhetkiltä 100 (=42 ms) (a) ja 150 näytettä (=62 ms) (b). Lyhenteet: GA = pelkkä kuvalähdemenetelmä, ED = kuvalähdemenetelmä + diffraktiokomponentit, WG = aaltojohtoverkkomenetelmä. [6].

5 AURAAALISAATIO

Auralisaatiota [8], eli mallinnustulosten kuultavaksi tekemistä, on tutkittu viimeisen vuosikymmenen ajan ympäri maailmaa. Ehdottomasti menestyksekkäin sovellusalue on tietokonepelit, joissa kolmiulotteisella ääniympäristöllä saadaan pelaaja uppoutumaan huomattavasti paremmin pelin luomaan keino todellisuuteen. Lisäksi suuntakuuloa mallintamalla (tai käyttämällä monikanavaista äänentoistoa) saadaan äänet kuulumaan eri suunnista, jolloin pelaajalle voidaan helposti välittää tieto esim. takaa lähestyvistä vihollisista. Peleissä realistinen, fysikaaliseen malliin perustuva, ääniympäristö ei kuitenkaan ole tarpeellinen, vaan riittää kun havaittu äänimaailma kuulostaa uskottavalta ja äänen tulosuunta saadaan välitettyä kuuntelijalle mahdollisimman tarkasti.

TKK:lla olemme keskittyneet elämyksellisen äänimaailman sijasta auralisoimaan fysikaaliseen malliin perustuvia simulointituloksia mahdollisimman tarkasti. Auralisaatiota varten simuloitavasta huoneesta tehdään 3D-pintamalli, jossa pinnoille voidaan myös määrittellä akustiset ominaisuudet (absorptiokertoimet oktaavikaistoittain). Tämän mallin pohjalta suora ääni ja

varhaiset heijastukset mallinnetaan käyttäen kuvalähdemenetelmää ja auralisoidaan digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla kuuntelijalle. Auralisoinnissa pystytään huomioimaan äänilähteen taajuusriippuva suuntaavuus, ilman ja pintamateriaalien absorptio, äänen kulkuajasta aiheutuva viive sekä äänen tulosuunta. Koska nykyaikaisilla tietokoneilla ei pystytä vielä laskemaan koko impulssivastetta kuvalähdemenetelmällä, lisätään auralisoinnissa jälkikaiuntaa varhaisten heijastusten lisäksi. Jälkikaiunta-algoritmi on parametrisoitu siten, että jälkikaiunta-aikaa pystytään säätämään taajuusriippuvasti ja jälkikaiunta kuullaan ajallisesti oikein suhteutettuna suoraan ääneen ja varhaisiin heijastuksiin. Jälkikaiunnan parametrit voidaan määrittää etukäteen joko tilan kokoon perustuen tai esim. säteenseurannalla kyseisen mallin pohjalta. Käyttämäämme auralisaatiota on käsitelty huomattavasti yksityiskohtaisemmin kahdessa AES:n julkaisussa [9,10].

5.1 Auralisaation evaluointi

Olemme yrittäneet myös evaluoida auralisaation laatua ja luonnollisuutta. Evaluoinnin vaikeus piilee siinä, että täysin virheetöntä referenssisignaalia mihin verrata auralisaatiota ei ole olemassa. Tämä johtuu siitä, että ei ole olemassa äänitystekniikkaa, jolla voitaisiin äänittää äänikenttä siten, että se olisi toistettavissa täsmälleen samanlaisena.

Evaluoinnissamme olemme käyttäneet mahdollisimman hyvää referenssisignaalia, eli olemme äänittäneet tutkittavassa tilassa kaiuttomia signaaleita tosipää-äänitystekniikalla [11]. Tosipää-äänitys tehdään siten, että pienet mikrofonit asetetaan korvakäytävien suulle, jolloin myös ihmisen ja pään vaikutus äänikenttään saadaan tallennettua. Luonnollisesti äänitys riippuu käytetyn pään muodoista ja ei ole täydellinen kaikille kuuntelijoille. Kuitenkin kuunneltaessa kuulokkeilla tällaista äänitystä aistitaan äänen tulosuunta, ja äänitetyn signaalin tilantuntu paljon parempi kuin normaalin stereoäänityksen avulla. Esimerkkitapauksena olemme tutkineet luentosalia, jonka geometria on yksinkertainen ja seinien absorptiokertoimet ovat tunnettuja.

Evaluointia olemme tehneet sekä objektiivisesti tutkimalla mitattuja ja mallinnettuja binauraalisia impulssivasteita [12] että subjektiivisesti tekemällä kuuntelukokeita [13]. Laskemalla huoneakustisia tunnuslukuja, kuten T20, EDT tai C50 saadaan tietoa jälkikaiunnan vaimenemisesta eri taajuuksilla sekä arvioita varhaisten heijastusten ja jälkikaiunnan suhteesta. Tarkkaa varhaisten heijastusten käyttäytymistä ei tunnusluvuilla kuitenkaan pystytä selvittämään. Vastavasti objektiivinen arviointi on lähes mahdotonta, jos kyseessä on dynaaminen tilanne, jossa kuuntelija liikkuu mitatussa/mallinnetussa tilassa. Siitä huolimatta objektiivinen analyysi kertoo, että mallinnuksella päästään hyvin lähelle mitattuja vasteita, suurimpien erojen ollessa pienillä taajuuksilla.

Subjektiivista evaluointia mallinnuksen uskottavuudesta olemme tehneet kuuntelukokein. Koehenkilöille soitettiin sekä mitattuja että mallinnettuja ääniraitoja ja heidän piti kertoa huomautko he eroa esim. tilan tunnussa, äänen värissä tai äänilähteen paikallistamisessa. Tulokset olivat yllättävän hyviä. Eroa ei huomattu juuri lainkaan soinnillisilla, impulssimaisilla ääniä hyvin vähän sisältävillä, herätteillä kuten klarinetti ja laulu. Impulssimaisilla herätteillä, kuten pikkurummun iskut, sen sijaan auralisoitu ääniraita kuulosti erilaiselta. Suurin ero havaittiin äänen värissä. Tämä johtunee kuvalähdemenetelmän puutteista ja kyvyttömyydestä mallintaa tarkasti pieniä taajuuksia, mutta edellä esitetystä diffraktiomallista toivomme löytävämme ratkaisun entistä parempaan auralisaatioon. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että erot tosipää-äänityksen ja mallinnukseen perustuvan auralisaation välillä, tässä tutkimuksessa tilassa, ovat lähinnä alle 400 Hz ja yli 8 kHz taajuusalueilla.

6 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa olemme esittäneet kaksi uutta mielenkiintoista huoneakustiikan mallinnusmenetelmää, jotka ovat tällä hetkellä tutkimuksen kohteena, muun muassa TKK:lla. Näillä menetelmillä saadaan entistä tarkempia ja luotettavimpia arvioita pienten taajuuksien käyttäytymisestä mallinnettavassa tilassa. Näiden lisäksi kerroimme lyhyesti auralisaatiosta ja varsinkin sen evaluoinnista. Nykyisillä menetelmillä on mahdollista tehdä jo varsin luonnollisen kuulosta auralisaatiota yksinkertaisista huoneakustisista malleista.

LÄHTEET

1. LOKKI T & SAVIOJA L, Auralisaatiodemonstraation toteuttaminen, *Akustiikkapäivät 1997*, Espoo 8.-9.10.1997, s. 101-106.
2. VÄLIMÄKI V & SAVIOJA L, Edistysaskelia moniulotteisen aaltoliikkeen mallinnuksessa, *Akustiikkapäivät 1999*, Tampere 4.-5.10.1999, s. 59-64.
3. ALLEN J B & BERKLEY D A, Image Method for Efficiently Simulating Small-room Acoustics. *J Acoust Soc Am* **65**(1979)4, s. 943-950.
4. BORISH J, Extension of the Image Model to Arbitrary Polyhedra. *J Acoust Soc Am* **75**(1984)6, 1827-1836.
5. SVENSSON U P, FRED R I & VANDERKOOY J, Analytic Secondary Source Model of Edge Diffraction Impulse Responses. *J Acoust Soc Am* **106**(1999)5, s. 2331-2344.
6. SVENSSON U P, SAVIOJA L, LOKKI T & KRISTIANSSEN U, Low-frequency Models for Room Acoustic Prediction. *Hyväksytty julkaistavaksi 17th ICA kongressissa*, Rooma, Italia, 2.-7.9.2001.
7. SAVIOJA L & VÄLIMÄKI V, Interpolated 3-D Digital Waveguide Mesh with Frequency Warping, Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Salt Lake City, UT, 15-19 May, 2001.
8. KLEINER M, DALENBÄCK B & SVENSSON P, Auralization - An Overview. *J Aud Eng Soc* **41**(1993)11, s. 861-875.
9. SAVIOJA L, HUOPANIEMI J, LOKKI T & VÄÄNÄNEN R, Creating Interactive Virtual Acoustic Environments. *J Aud Eng Soc* **47**(1999)9, s. 675-705.
10. LOKKI T, HIIPAKKA J & SAVIOJA L, A Framework for Evaluating Virtual Acoustic Environments. *AES 110th Int Conv*, Amsterdam 2001, preprint nr. 5137.
11. MAIJALA P, Parempia binauraalisia äänityksiä tosipaällä?, *Akustiikkapäivät 1997*, Espoo 8.-9.10.1997, s. 19-24.
12. LOKKI T, Objective Comparison of Measured and Modeled Binaural Room Responses. *Proc. 8th Int. Congr. Sound and Vibration (ICSV8)*, Hong Kong, China, 2.-6.7.2001, s. 2481-2488.
13. LOKKI T & JÄRVELÄINEN H, Subjective Evaluation of Auralization of Physics-based Room Acoustics Modeling. *Proc. 7th Int. Conf. Auditory Display (ICAD'2001)*, Espoo 29.7. - 1.8.2001, s. 26-31.