

# HUONEAKUSTIIKAN MALLINNUS VIRTUAALISELLA AALTOKENTTÄSYNTEESILLÄ

**Samuel Siltanen ja Tapio Lokki**

Teknillinen korkeakoulu, Mediatekniikan laitos  
PL 5400, 02015 TKK  
Samuel.Siltanen@tml.hut.fi

## 1 JOHDANTO

Huoneakustiikan mallinnukseen käytetyt menetelmät voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: numeerisiin menetelmiin aaltoyhtälön ratkaisemiseksi ja geometrisen akustiikan menetelmiin. Numeeriset menetelmät, kuten Finite Element Method, Boundary Element Method ja Finite Difference Time Domain -menetelmät, perustuvat aaltoyhtälön diskreetointiin. Nämä menetelmät ovat usein laskennallisesti raskaita ja soveltuvat parhaiten pienille taajuuksille, joilla voidaan käyttää harvaa geometrian diskreetointia. [1]

Toisaalta geometrisen huoneakustiikan menetelmät perustuvat äänen käsittelyyn säteinä, jotka edustavat heijastuspolkuja. Tässä yksinkertaistuksessa jätetään huomiotta aaltopohjaiset ilmiöt kuten diffraktio, joka täytyy mallintaa erikseen, jos se halutaan huomioida [2, 3]. Geometrisessä mielessä tarkat heijastuspolut saadaan kuvälähdemenetelmällä tai sen optimoidulla versiolla, josta käytetään nimeä beam tracing [4, 5]. Ongelmana on kuitenkin se, että kuvälähteiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti heijastuspolkujen pidentyessä. Näin ollen vain varhaiset heijastukset voidaan laskea tehokkaasti.

Tässä paperissa esitelty sekundäärisiin lähteisiin perustuva menetelmä kykenee tuottamaan ratkaisun, jossa on huomioitu myös aaltopohjaiset ilmiöt. Lisäksi eksponentiaalisen kasvun ongelmaa ei synny korkeamman asteen heijastuksia mallinnettaessa. Menetelmä yhdistää kuvälähdemenetelmän idean aaltokenttäsynteessin teoriaan [6]. Seuraavassa luvussa esitellään kehitetyn menetelmän teoreettinen tausta. Sitten näytetään, että menetelmä tuottaa hyviä simulointituloksia ja lopuksi pohditaan menetelmän rajoituksia ja mahdollista tulevaa tutkimusta aiheesta.

## 2 VIRTUAALISEN AALTOKENTTÄSYNTEESIN TEORIA

Tässä luvussa esitetään hyvin lyhyesti kolmiulotteisen aaltokenttäsynteessin teoriaa. Sitten näytetään miten kuvälähteet voidaan esittää pinnoille sijoitetuilla dipolijakaumilla. Tämä yleistetään myös korkeamman asteen heijastuksiin ja epäideaalisiin tapauksiin.

### 2.1 Kolmiulotteinen aaltokenttäsynteesi

Kolmiulotteisen aaltokenttäsynteessin ideana on toistaa mahdollisimman tarkasti virtuaalisen äänilähteen kenttä sekundääristen äänilähteiden avulla. Fyysisessä toteutuksessa sekundääriset lähteet olisivat kaiuttimia, jotka olisi sijoitettu seinälle. Kaiuttimiin syö-

tetäisiin signaali, jota on oikein viivästetty ja suodatettu niin, että kaiutimien tuottamien kenttien summa vastaisi seinän takana olevan äänilähteen kenttää huoneessa. Tässä paperissa esitellyssä menetelmässä sekundääriset lähteet ovat virtuaalisia, mutta kaavat, joilla niiden signaalit saadaan ovat täsmälleen samat kuin fyysisessäkin toteutuksessa.

Tarvittavat kaavat saadaan hyödyntäen Rayleighin toista integraalia [7]. Sen avulla voidaan paineille johtaa seuraavanlainen riippuvuus:

$$p(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_S p(\vec{r}_0) \left( \frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR} \cos \theta}{R} dS_0, \quad (1)$$

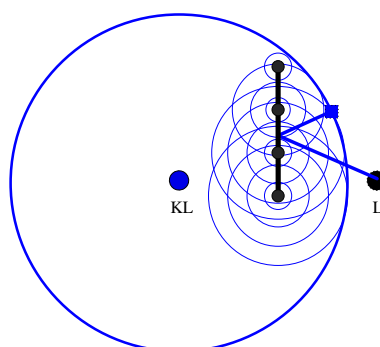
missä  $p(\vec{r})$  on paine jossakin pisteessä tason positiivisella puolella,  $S$  on heijastava taso,  $p(\vec{r}_0)$  on paine tuolla tasolla (tai tarkkaan ottaen välittömästi sen positiivisella puolella),  $R = |\vec{r} - \vec{r}_0|$ ,  $\theta$  on kulma tason normaalin ja vektorin  $\vec{r} - \vec{r}_0$  välillä ja  $k$  aaltoluku. Tämän riippuvuuden avulla on mahdollista esittää äänilähde jollakin pinnalla sijaitsevana dipolijakaumana. Sekundääriset lähteet ovat siis dipoleja, joiden kenttä vastaa integroitavaa termiä yllä esitetyssä kaavassa.

Käytännössä dipoleja voidaan sijoittaa tasolle vain äärellinen määrä, vaikka edellä esitetty integraali edellyttäisi äärettömän tiheää jakaumaa. Integraali voidaan approksimoida Riemannin summana, jolloin voidaan käyttää äärellistä määrää dipoleja. Mitä korkeampaa taajuutta halutaan mallintaa, sitä tiheämpi jakauma tarvitaan. Nyquistin teoremaa vastaavasti tarvittava tiheys on kaksi dipolia aallonpituutta kohden.

## 2.2 Kualähteen esittäminen sekundäärisillä lähteillä

Kualähdemenetelmässä heijastus pinnasta korvataan kvalähteellä, joka muodostetaan peilaamalla äänilähde heijastavan tason suhteen. Näin ollen, jos äänilähde on tason edessä, kvalähde on samalla etäisyydellä tason takana. Tason takana oleva lähde on puolestaan mahdollista esittää kolmiulotteisen aaltokenttäsynteesin teorian mukaan tasolle sijoitetulla dipolijakaumalla. Kukin dipoli vastaa yhtälön (1) integroitavaa, mutta vastakkaisella etumerkillä. Kuva 1 havainnollistaa tätä prosessia.

Jos äänilähde onkin alunperin tarkasteltavan tason väärällä puolella, ei kvalähdemenetelmän mukaista heijastusta tasolta voi tapahtua. Sen sijaan tuo taso varjostaa geometrisessa akustiikassa tason edessä olevaa aluetta siten että kenttä on nolla. Nämä varjoalueet löydetään kvalähdemenetelmässä näkyvyystarkasteluilla. Jos kuitenkin muodostetaan kenttä siten, että suoran äänen annetaan ulottua myös varjoalueille, mutta varjostavalta tasolta lähetetään vastaava negatiivinen kenttä, joka kumoaa suoran äänen kentän, on näkyvyystarkastelu tarpeeton. Johtuen dipolien antisymmetrisestä luonteesta, tuo negatiivinen kenttä saadaan virtuaalisessa aaltokenttäsynteesissä aikaiseksi täsmälleen samalla dipolijakaumalla kuin suoraa ääntä vastaavan kvalähteen kenttä. Näin ollen kvalähteen muodostama kenttä voidaan muodostaa ja lähettää myös äänilähteen ollessa tason negatiivisella puolella. Tämä toimenpide eliminoi näkyvyystarkastelut ja nopeuttaa laskentaa. On syytä huomioida, että dipoleista huomioidaan laskennassa vain tason positiivinen puoli ja toisen puolen kenttä asetetaan nollassi. Tämä johtuu tavasta, jolla edellisessä luvussa esitetty kaava on johdettu.



Kuva 1: Kuvassa musta piste  $L$  edustaa äänilähdettä. Sen vasemmalla puolella oleva taso on heijastava taso, jonka suhteen kuvalähde muodostetaan. Kuvalähteeksi saadaan näin ollen sininen piste  $KL$ . Sen ympärille piirretty sininen suuri kehä edustaa heijastunutta aaltorintamaa, jota vastaava eräs heijastuspolku on piirretty kuvaan (viiva, joka kulkee lähteestä tason kautta kehälle). Tuo vastaava aaltorintama voidaan saada aikaan heijastavalle tasolle sijoitettujen dipolien tuottamien aaltorintamien summana, joita kuvassa edustavat pienemmät kehät. Menetelmän idea on siis korvata kuvalähde pinnalle sijoitetuilla dipoleilla.

### 2.3 Yleistys korkeamman kertaluokan heijastuksiin

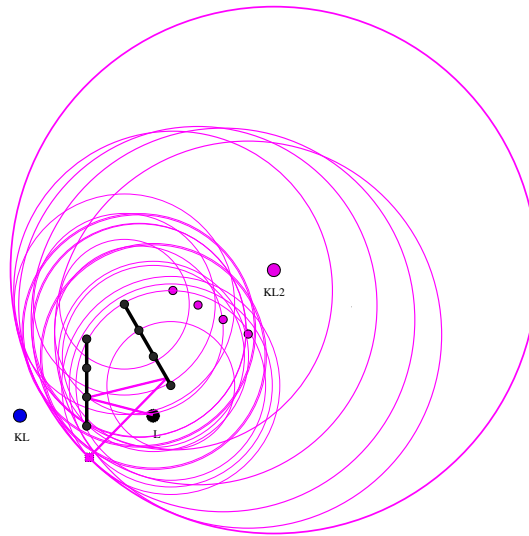
Koska edellä esitettyssä ei oletettu alkuperäisen lähteen tyypistä mitään, lähde voi hyvin olla myös sekundäärinen dipolilähde. On siis mahdollista heijastaa kukin sekundäärinen lähde muiden tasojen suhteen ja esittää näin saadut kuvalähteet edelleen sekundääristen lähteiden avulla. Näin saadaan laskettua korkeamman kertaluokan heijastuksia ilman, että kuvalähteitä tarvittaisiin eksponentiaalisesti enemmän kertaluvun kasvaessa, koska sekundääristen lähteiden määrä pysyy vakiona. Tätä on esitetty kuvassa 2.

Dipolien väliset heijastukset on mahdollista esittää matriisimuodossa ja tallentaa, jolloin tuon matriisin korottaminen johonkin potenssiin vastaa kyseisen kertaluokan heijastuksia. Heijastukset voidaan laskea etukäteen haluttuun kertaluokkaan asti ja summata ne yhteen matriisiin. Tällöin riittää laskea vain äänilähteen aiheuttama kenttä dipoleissa, kertoa se esilasketulla heijastusmatriisilla ja edelleen laskea dipolien näin aiheuttama kenttä kuuntelijalle. On todennäköistä, että tämä on mahdollista tehdä reaaliajassa nykyisillä tietokoneilla.

### 2.4 Yleistys epäideaalisiin tapauksiin

Koska yhtälö (1) on todellisuudessa kirjoitettu äärettömälle tasolle, äärellisten polygonien tapauksessa muodostunut kenttä diffraktoi sen reunoista. Aaltokenttäsynteesin fyysisissä toteutuksissa tämä diffraktio on perinteisesti katsottu ei-toivottavaksi ilmiöksi [8], mutta nyt esitettyssä menetelmässä sen ansiosta saadaan diffraktion mallinnus “ilmaiseksi”. Lisäksi Huygensin periaatteen nojalla on nähtävissä, että diffraktio tapahtuu oikein.

Edellä on esitetty heijastuksen laskenta ideaalisessa tapauksessa. Jos heijastus ei ole ideaalinen peiliheijastus, vaan osa äänestä absorboituu, on dipolien voimakkuudet kerrotta-



Kuva 2: Korkeamman kertaluokan heijastukset voidaan mallintaa peilaamalla sekundaariset lähteet kuten kuvalähteet ja esittämällä ne edelleen toisten sekundääristen lähteiden avulla. Kuvassa näkyy oikealla toisen kertaluokan kuvalähde KL2 ja sen vieressä ensimmäiselle tasolle sijoitettuja dipoleja vastaavat kuvalähteet. Jälleen nämä voidaan esittää toiselle tasolle sijoitettujen dipolien avulla, ja siten saadaan niiden summana tuotettua aaltorintama, joka vastaa toisen asteen heijastusta.

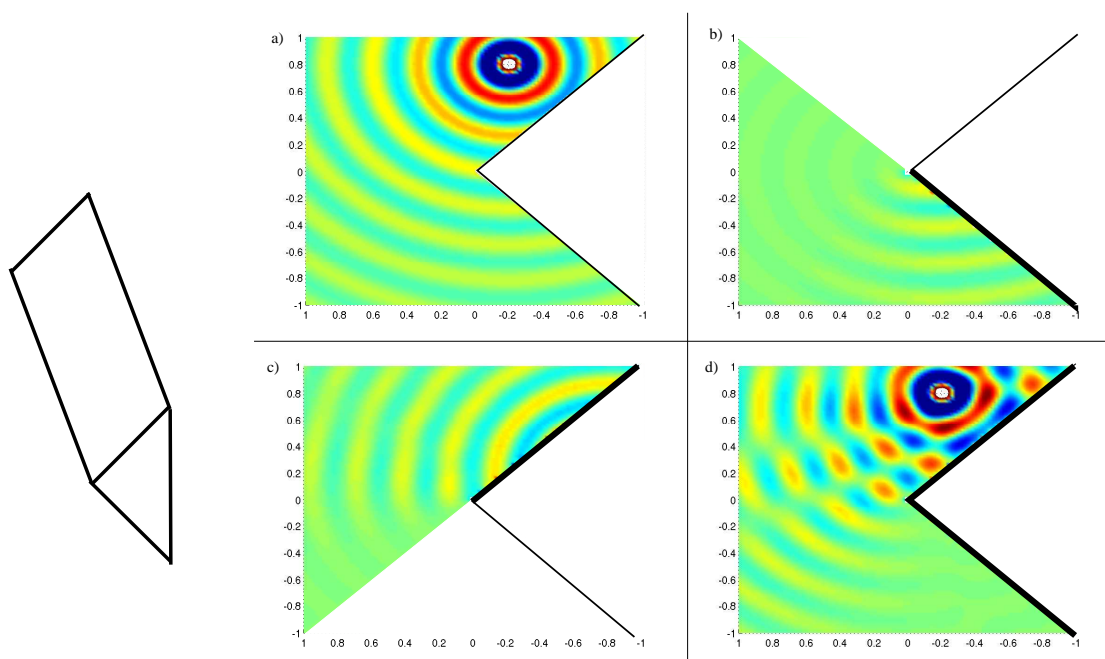
va materiaalin heijastuskertoimella. Varjostavilla polygoneilla tätä kertomista ei tehdä. Diffuusit heijastukset voidaan mallintaa poikkeuttamalla dipolien laskennassa käytettäviä pinnan normaaleja satunnaisesti. Tätä ei kuitenkaan tarvita, jos dipoleja sijoitetaan pinnoille tarpeeksi tiheästi.

Yhtälö (1) on esitetty taajuustasossa, ja sitä voidaan hyödyntää laskettaessa tuloksia pistetaajuuksille. Tuosta yhtälöstä voidaan ottaa käännteinen Fourier-muunnos, jolloin saadaan vastaava aikatason yhtälö, jota voidaan käyttää laajakaistaisten ratkaisujen laskemiseksi. Materiaalit on tosin tällöin toteutettava joko oktaavikaistoittaisina kertoimina tai monimutkaisempina materiaalisuotimina.

### 3 TULOKSIA

Menetelmä toteutettiin sekä Matlabilla taajuustasossa että C++:lla aikatasossa. Taajuustason toteutusta käytettiin simuloimaan yksinkertaisia tapauksia, joissa aaltopohjaiset ilmiöt näkyvät. Toisaalta aikatason toteutuksella simuloitiin realistisen kompleksisia malleja. Kuva 3 esittää yksinkertaista reunaa sekä heijastusta ja diffraktiota, jonka se synnyttää. Reuna on kolmiulotteinen, vaikka kuva näyttääkin siitä vain poikkileikkauksen.

Aikatason toteutusta testattiin äänitysstudion mallilla, josta oli saatavissa mitattua dataa [9]. Tuloksista laskettiin tyypillisiä akustisia tunnuslukuja, jotka on esitetty kuvassa 4 sekä mitatulle että simuloitulle datalle eri lähde-kuuntelijapareille ja eri taajuuksille.



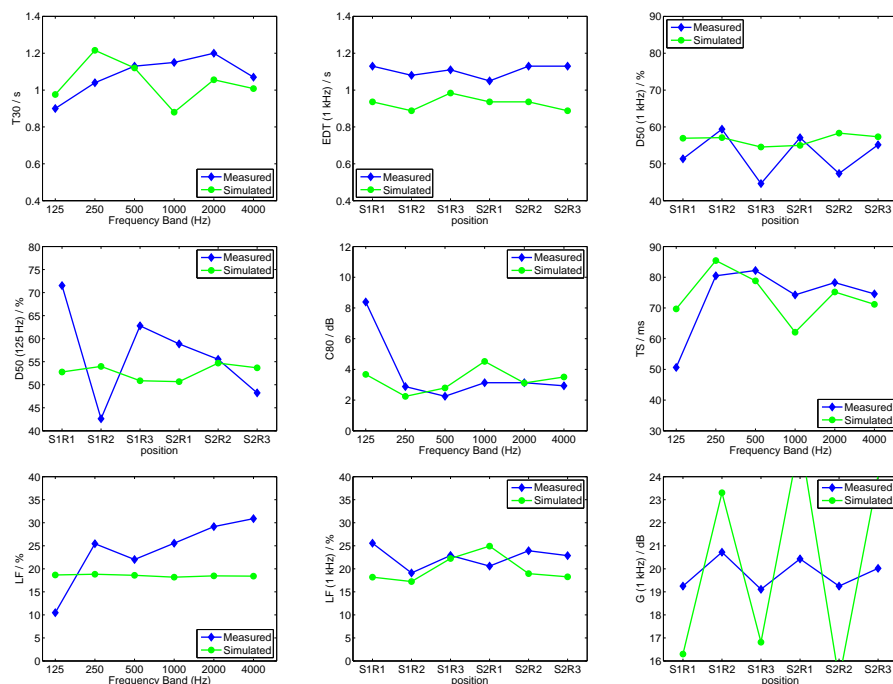
Kuva 3: Vasemmalla visualisoidusta särmästä heijastunut ja diffraktoitunut kenttä (d) koostuu kolmesta osasta: (a) suorasta äänestä, (b) reunan varjostavalle puolelle sijoitettujen dipolien tuottamasta negatiivisesta kentästä sekä (c) reunan heijastavalle puolelle sijoitettujen dipolien tuottamasta kentästä.

## 4 POHDINTAA

Esitetty menetelmä ratkaisee joitakin aiempien huoneakustiikan mallinnusmenetelmien keskeisiä ongelmia. Aaltopohjaiset ilmiöt, kuten diffraktio, saadaan mallinnettua suoraan. Lisäksi eksponentiaalisen kasvun ongelma on ratkaistu, koska käytetään vakio määrää sekundäärisiä lähteitä. Esitetyssä menetelmässä on silti toki vielä tutkittavaa. Akustinen kenttä ei rakennu oikein lähikentässä, minkä vuoksi tietynlaisissa malleissa saattaa esiintyä numeerista epästabiiliutta. Korkeiden taajuuksien mallintaminen oikein vaatii suhteellisen tiheän dipolijakauman, mikä pidentää laskenta-aikaa. Muistin kulutus saattaa tulla ongelmaksi, jos halutaan korkea aikaresoluutio mallinnettuihin vasteisiin, koska jokainen dipoli vaatii oman impulssivasteen muistiin. Materiaaliabsorptiota ei ole toteutettu vielä kovin hyvin, vaan ainoastaan oktaavikaistoittaisilla heijastuskerroimilla. Pinnat on lisäksi oletettu lokaalisti reagoiviksi, mikä ei välttämättä pidä paikkaansa, varsinkaan pienillä taajuuksilla. Tulevassa tutkimuksessa pystyttänee kuitenkin löytämään ratkaisuja edellä esitettyihin rajoituksiin, jolloin ollaan pääsemässä lähelle yleispätevää, tehokasta huoneakustiikan mallinnusmenetelmää.

### Kiitokset

Tämä työ on tehty Suomen Akatemian (projekti 119092) ja Euroopan tutkimusneuvoston (ERC, projekti 203636) rahoituksella.



Kuva 4: Akustisten tunnuslukujen vertailua eri lähde-kuuntelijapareille ja eri taajuuksille.

## VIITTEET

- [1] SVENSSON U & KRISTIANSEN U, Computational modeling and simulation of acoustic spaces, in *AES 22nd Int. Conf.*, pages 11–30, Espoo, Finland, June 15–17 2002.
- [2] SVENSSON U P, FRED R I, & VANDERKOOY J, An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **106**(1999) 5, 2331–2344.
- [3] TSINGOS N, FUNKHOUSER T, NGAN A, & CARLBOM I, Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction, in *Proceedings of the SIGGRAPH'01*, pages 545–552, 2001.
- [4] BORISH J, Extension to the image model to arbitrary polyhedra, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **75**(1984), 1827–1836.
- [5] FUNKHOUSER T, CARLBOM I, ELKO G, PINGALI G, SONDDHI M, & WEST J, A beam tracing approach to acoustics modeling for interactive virtual environments, in *Proceedings of the SIGGRAPH'98*, pages 21–32, 1998.
- [6] START E W, *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*, Ph.D. thesis, Delft university of Technology, 1997.
- [7] MORSE P M & INGARD K U, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [8] SPORS S, RABENSTEIN R, & AHRENS J, The theory of wave field synthesis revisited, in *Proceedings of AES 124th Convention*, 2008, paper 7358.
- [9] BORK I, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - Part I: Measurements, *Acta Acustica united with Acustica*, **91**(2005), 740–752.