

KOLMIULOTTEISEN TILAN AKUSTIIKAN MALLINTAMINEN KAKSIULOTTEISIA AALTOJOHTOVERKKOJA KÄYTTÄEN

Antti Kelloniemi¹, Vesa Välimäki²

¹ Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio,
PL 5400, 02015 TKK, antti.kelloniemi@tkk.fi

² Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio,
PL 3000, 02015 TKK, vesa.valimaki@tkk.fi

1 JOHDANTO

Aaltojohtoverkko (digital waveguide mesh) on menetelmä mallintaa aaltoliikettä, vaikkapa äänen etenemistä. Viime vuosien tutkimuksen tuloksena huoneakustiikan mallintamisessa välttämättömien reunaehto- ja kalusteiden tai oviaukkojen, mallintaminen on parantunut merkittävästi. Aaltojohtoverkon kehitystä huoneakustiikan suunnittelun työkaluksi hidastaa yhä erityisesti laskennan raskaus kolmessa ulottuvuudessa. Esittelemme nyt tavan, jolla huoneakustiikan approksimointi onnistuu laskennallisesti kevyempiä kaksikulotteisia aaltojohtoverkkoja käyttäen.

2 HUONEAKUSTIIKAN MALLINTAMINEN AALTOJOHTOVERKOLLA

Huoneakustiikan mallintamisessa käytetään yleisesti geometrisia menetelmiä, kuten säteenseurantaa tai kovalähdemenetelmää. Laskennan raskaudesta johtuen näitä hyödynnetään yleensä vain aikaisten heijastusten suuntien ja voimakkuuksien mallintamisessa. Jälkikäiunta puolestaan lasketaan tilastollisia malleja tai viiveverkkoja käyttäen.

Näistä menetelmistä poiketen aaltojohtoverkkoja voidaan käyttää koko impulssivasteen simuloimiseen. Heijastusten suunnat ja saapumisajat saadaan oikein, koska verkko on aito fysikaalinen malli tilasta. Laskennan rekursiivisuus puolestaan mahdollistaa pitkienkin vasteiden laskemisen ilman muistin tarpeen kasvua. Koska menetelmä sisältää diffraktio- ja interferenssi-ilmiöiden mallintamisen, sitä voidaan käyttää myös pienten tilojen ja matalien taajuuksien mallintamiseen, missä geometrinen menetelmien tuottama virhe tyypillisesti kasvaa.

Yksikulotteinen aaltojohto rakennetaan liittämällä kaksi viivelinjaa toisiinsa yksikköviivojen välisillä solmuilla, joiden kohdilla mahdolliset väliaineen muutokset mallinnetaan admittanssikertoimilla. Rakenne voidaan laajentaa moneen ulottuvuuteen liittämäl-

lä useampia viivelinjoja yhteen [1], mikä mahdollistaa sen käytön huoneakustiikan fyysikaalisena mallina [2, 3, 4]. Aaltojohtoverkossa viivelinjat risteävät säännöllisin välein sijoitelluissa solmuissa. Useista mahdollisista rakenteista käytämme tässä suorakulmaista hilaa sen verrattain helpon käsiteltävyyden vuoksi. Laskennan numeeriset virheet on minimoitu käyttämällä interpoloitua hilarakennetta sekä taajuusvarppausta [5].

Verkossa etenevän signaalin arvo p solmukohdassa k lasketaan seuraavasti [6]:

$$p_k(n) = \frac{2 \sum_l Y_l h_l p_l(n-1)}{\sum_l Y_l h_l} - p_k(n-2), \quad (1)$$

missä l merkitsee k :n naapurisolmuja, n on aika-askelen indeksi, Y kunkin solmujen välisen yhteyden admittanssi ja h interpolointikerroin. Heijastavat pinnat toteutetaan malliin reaalisiä admittanssikertoimia käyttäen ja aaltojohtoverkko katkaistaan laskenta-alueen reunoilla heijastamattomilla reunaehdoilla [7].

Mallinnuksen ylärajataajuus on neljäsnes näytteenottotaajuudesta, mikä puolestaan määrättyy käytetyn aaltojohtoverkon solmujen välimatkan Δx mukaan,

$$f_s = \frac{c\sqrt{N}}{\Delta x}, \quad (2)$$

missä c on äänen nopeus ja N käytetyn mallin ulottuvuuksien määrä.

Kolmiulotteinen interpoloitu aaltojohtoverkko on varsin raskas laskettava. Esimerkiksi $10 \times 10 \times 10$ solmukohdan mallin laskeminen vaatii 27000 yhteenlaskua ja 4000 tuloa aika-askelta kohden ja kaikkiaan 2000 muistipaikkaa. Siksi päätimme yksinkertaistaa mallia käyttäen kolmiulotteisen mallin sijaan kaksiulotteisia leikkauksia tilan muodon approksimaationa. Approksimaation toiminnan ehtona on, että tila on lähes suorakulmainen. Tällaiseen tilaan syntyy seisovia aaltoja mooditaajuuksille

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}, \quad (3)$$

missä L_x , L_y ja L_z ovat tilan pääakselien suuntaiset mitat ja n_x , n_y ja n_z moodien kokonaislukuindeksit.

Mallissa kolme kaksiulotteista aaltojohtoverkkoa määritetään tilan seinien kokoisiksi ja kullekin verkon reunalle määritetään vastaavan seinän keskimääräinen heijastuskerroin. Lähetys- ja kuuntelupisteiden paikat projisoidaan verkoille ja lopuksi kullakin verkolla lasketut vasteet summataan yhteen. Näin saadaan mallinnettua tilan pääakselien suuntaiset eli aksiaaliset moodit, joissa aina joko n_x , n_y tai n_z yhtälössä (3) on nolla.

Lisäksi voidaan laskea muita leikkauspintoja. Approksimaation tarkkuutta merkittävästi parantavaksi havaittiin vähintään yhden pienemmän 2-ulotteisen aaltojohtoverkon määrittäminen myös muiden kuin aksiaalisten moodien mallintamiseksi. Tällaisen verkon

yhdeksi dimensioksi valitaan tilan jonkin seinän pituus L_x ja toinen dimensio määräytyy yhtälön (3) mukaan yhdistelmänä kahden muun seinän pituuksista L_y ja L_z ,

$$L_{diag} = \left(\frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Tällainen malli vaatii edellisen esimerkin mukaisen verkon kattaman tilan mallintamiseksi vain 371 solmukohtaa, eli 742 muistipaikkaa joiden päivittämiseen menee 3339 yhteenlaskua ja 1113 tuloa aika-askelta kohden. Laskennan määrä kolmiulotteiseen malliin verrattuna vähenee siis noin seitsemäsosaan ja muistin tarve alle viidesosaan.

3 MOODITAAJUUKSIEN APPROKSIMOINTI

Esimerkkinä tutkittiin Teknillisen korkeakoulun T3-luentosalin akustiikan mallintamista. Tilasta oli ennen mittauksia kannettu pöydät ja tuolit ulos. Salin lattia on $12 \times 7,3$ metrin kokoinen ja katto $6,6 \times 11,3$ metrin kokoinen niin, että takaseinä ja takaa katsoen vasen sivuseinä ovat kaltevat. Katto on 2,8 metrin korkeudessa, mutta kolmen metrin etäisyydellä etuseinästä alkaa takaseinään ja molempiin sivuseiniin asti ulottuva 40 cm muuta kattoa alemmas laskettu Acoustile-levyistä valmistettu ääntä absorboiva pinta.

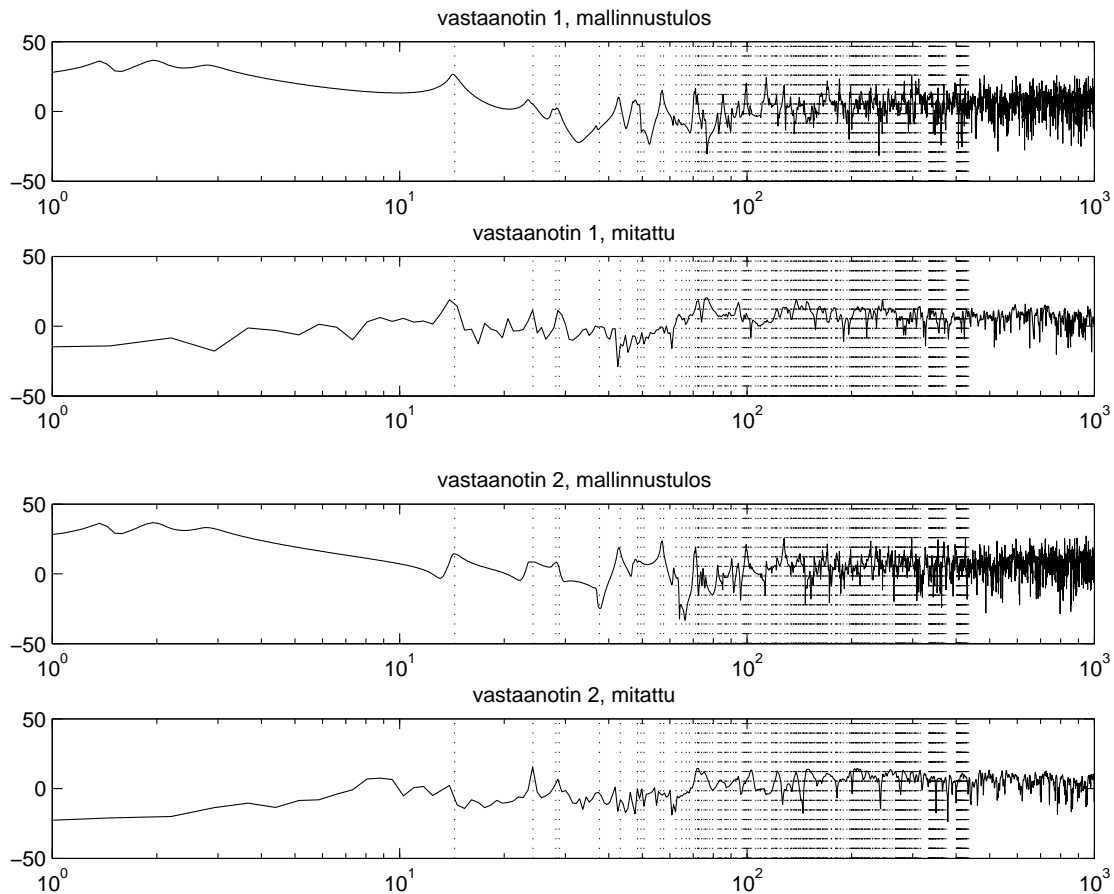
Äänilähde oli asetettu 2,7 metrin päähän vasemmasta sivuseinästä ja etuseinästä, 1,2 metrin korkeuteen. Vaste mitattiin kahdessa paikassa 10 metrin ja 5 metrin päässä etuseinästä, 2 metrin päässä vasemmasta sivuseinästä, 1,7 metrin korkeudella.

Karkeassa simulaatiossa tila mallinnettiin $1,16 \times 6,9 \times 2,5$ m³ suorakulmaisena särmiönä. Katon heijastuskertoimeksi asetettiin 0,9, muille pinnoille 0,97. Verkon solmujen välimatkaksi asetettiin $\Delta x = 10$ cm, mikä vastaa näytteenottotaajuutta $f_s \approx 4,7$ kHz. Herätteenä käytettiin 3 dB/oktaavi laskevan suotimen impulssivastetta ja simulaatiota ajettiin 65536 aika-askelen ajan, mikä vastaa noin 14 sekuntia.

Kuvassa 1 nähdään, että matalimmat mooditajuudet osuvat varsin hyvin kohdalleen näinkin yksinkertaisella mallilla. Moodien Q-arvoissa ja voimakkuuksissa virhe on suurempi johtuen erityisesti kolmiulotteisen tilan mallintamisesta kaksiulotteisilla leikkauksilla ja heijastuskertoimien approksimoinnista reaalilla vakioilla. Erot eri mittauspisteiden tuloksissa ovat kuitenkin samanlaisia mallinnetuissa ja mitatuissa vasteissa.

4 AALTOJOHTOVERKKO VISUALISOINTITYÖKALUNA

Koska aaltojohtoverkossa solmukohdasta toiseen etenevät arvot kuvaavat suoraan fyysikaalista äänipainetta, voidaan arvoja visuaalisesti seuraamalla nähdä aallon eteneminen.



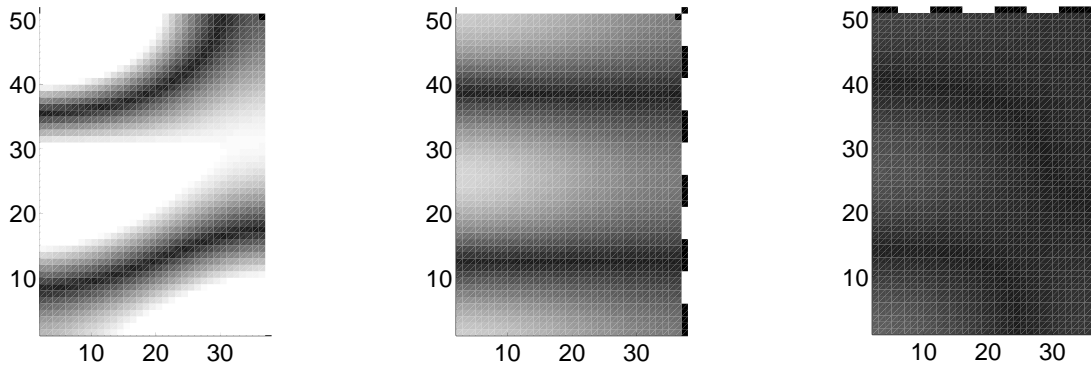
Kuva 1: Salin mallinnetut ja mitatut impulssivasteet.

Kolmiulotteista verkkoa käyttäen tehtävä on kuitenkin varsin haastava, sillä jo parin heijastuksen jälkeen selkeä aaltorintama on tyypillisesti hajonnut moniksi eri suuntiin eteneviksi aalloiksi.

Tarkastelemalla kolmiulotteisen mallin yhtä leikkauspintaa kuva tulee ihmiselle helpommin ymmärrettäväksi, mutta edelleen muut kuin pinnan suuntaisesti etenevät aallot näyttävät syntyvän tyhjästä ja tekevät visualisoinnin seuraamisen vaikeaksi.

Mallintamalla tilaa jälleen kaksiulotteisilla aaltojohtoverkoilla nähdään vain valitun pinnan suuntaisesti etenevät aallot. Tarkastelemalla useita pintoja erikseen tulee visualisoinneista merkittävästi selkeämpiä kuin täyttä kolmiulotteista mallia käyttämällä. Osa heijastuksista jää huomioimatta, mutta tärkeimpien aaltorintamien käyttäytyminen sekä seisovien aaltojen ja tärykaikujen syntyminen nähdään nyt selkeämmin.

Esimerkkinä kuvissa 2 ja 3 tarkastellaan suorakulmaiselle ja monimutkaisemman muotoiselle kaksiulotteiselle leikkauspinnalle syntyviä aaltoja. Kuviin on piirretty äänipai-



Kuva 2: Ääniaalto suorakulmaisessa tilassa visualisoituna kaksiulotteisella aaltojohtoverkolla. Muiden seinien heijastuskertoimen on $r = 1$, katkoviivalla merkityn $r = 0,7$.

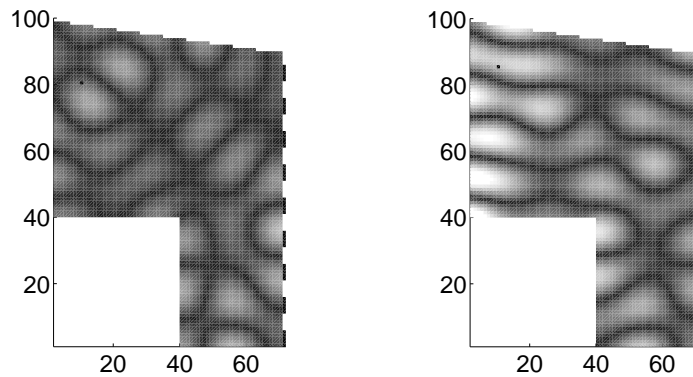
neen itseisarvot. Ensimmäisellä kuvasarjalla havainnollistetaan katkoviivalla merkityn absorboivan seinämateriaalin sijoituspaikan merkitystä seisovien aallojen vaimentamisessa. Koska heräte on kuvassa pystysuuntaan syntyvän seisovan aallon taajuudella, absorptio ei sivuseinällä (keskimmäisessä kuvassa) vaikuta tulokseen yhtä tehokkaasti kuin päätyseinällä (oikean puolimmaisessa kuvassa). Kuvaparissa 3 nähdään, kuinka äänilähteen siirtäminen 0,5 m lähemmäs viistoa seinää vaikuttaa äänikentän muotoon, mm. seisovan aallon heräämiseen vasemmanpuoleisen päätyseinän läheisyydessä.

5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esittelimme ajatuksen huoneen äänikentän simuloimisesta kaksiulotteisten aaltojohtoverkkojen avulla. Yksi laskennallisesti raskas kolmiulotteinen simulaatio korvataan vähintään kolmella kaksiulotteisella aaltojohtoverkolla. Lähestymistavan etuja ovat laskentakuorman ja muistin tarpeen vähenemisen lisäksi hyvät visualisointimahdollisuudet: aaltoliikkeen mallintaminen kaksiulotteisessa poikkileikkauksessa poistaa kuvasta ylimääräisiä heijastuksia ja seisovia aaltoja, jotka muuten sotkevat leikkauspinnan tarkastelua. Yhden ulottuvuuden vähentäminen mallista aiheuttaa virheitä huoneen moodien voimakkuuksissa ja Q-arvoissa. Osa moodeista jää mallinnuksesta kokonaan pois, jos ne eivät synny valituilla kaksiulotteisilla leikkauspinoilla.

KIITOKSET

Kiitokset Tapio Lokille salimittauksista sekä Lauri Saviojalle aiheeseen liittyneistä keskusteluista. Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet Suomen Akatemia (projekti 201050) sekä Nokia Oyj:n Säätiö.



Kuva 3: Ääniaallon muoto huoneessa riippuu merkittävästi äänilähteen (musta piste ylhäällä vasemmalla) paikasta. Lähde on vasemmassa kuvassa pisteessä $(8,0;1,0)$ m, oikeassa kuvassa pisteessä $(8,5;1,0)$ m. Muiden seinien heijastuskerroin on $r = 0,98$, katkoviivalla merkityn $r = 0,8$.

VIITTEET

- [1] SMITH J O, Physical modeling using digital waveguides, *Computer Music Journal*, **16**(1992) 4, 74–91.
- [2] VÄLIMÄKI V & SAVIOJA L, Edistysaskelia moniulotteisen aaltoliikkeen mallinnuksessa, in *Akustiikkapäivät*, pages 59 – 64, Akustinen seura ry., Tampere, 1999.
- [3] LOKKI T & SAVIOJA L, Huoneakustiikan mallinnus ja auralisaatio — katsaus nykytutkimukseen, in *Akustiikkapäivät 2001*, pages 129 – 134, Akustinen seura ry., Espoo, 2001.
- [4] KELLONIEMI A & SAVIOJA L, Reunaehtojen toteutustapoja aaltojohtoverkossa, in *Akustiikkapäivät*, pages 73 – 78, Akustinen seura ry., Turku, 2003.
- [5] SAVIOJA L & VÄLIMÄKI V, Interpolated rectangular 3-D digital waveguide mesh algorithms with frequency warping, *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, **11**(2003) 6, 783–790.
- [6] VAN DUYNÉ S & SMITH J O, The 2-D digital waveguide mesh, in *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'93)*, New Paltz, NY, USA, 1993.
- [7] KELLONIEMI A, Improved adjustable boundary condition for the 2-D digital waveguide mesh, in *Proc. Int. Conf. Digital Audio Effects (DAFx)*, Madrid, Espanja, 2005.