

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Tapio Lokki

**VIRTUAALIÄÄNIYMPÄRISTÖN
LUOMINEN KONSERTTISALIN
LASKENNALLISEEN MALLIIN**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 15. joulukuuta 1997.

Työn valvoja

Professori

Matti Karjalainen

Työn ohjaaja

TkL

Lauri Savioja

Tekijä:	Tapio Lokki	
Työn nimi:	Virtuaaliääniympäristön luominen konserttisalin laskennalliseen malliin	
Päivämäärä:	15. joulukuuta 1997	Sivumäärä: 76
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori:	Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka	koodi: S-89
Työn valvoja:	Professori Matti Karjalainen	
Työn ohjaaja:	TkL Lauri Savioja	
Tässä diplomityössä on toteutettu järjestelmä, jonka avulla voidaan luoda virtuaaliääniympäristö tietokoneella mallinnettuun tilaan. Virtuaaliääniympäristöllä tarkoitetaan äänilähdettä, tilan akustiikkaa ja kuuntelijaa mallintamalla tuotettua kolmiulotteista ääniympäristöä, jota voidaan kuunnella joko kuulokkeilla tai kaiuttimilla. Työ alkaa katsauksella huoneakustiikan laskennallisiin menetelmiin, joilla pyritään kuvaamaan äänen käyttäytymistä mallinnetussa tilassa. Tähän työhön on akustiikan laskennalliseksi menetelmäksi valittu aika-alueessa toimiva kuvalähdemenetelmän sekä keinotekoisen jälkikaiun hybridimenetelmä, koska se mahdollistaa vuorovaikutteisen virtuaaliääniympäristön toteutuksen. Kuvalähdemenetelmän fysikaalisen perustan ja toteutustapojen läpikäynnin jälkeen on esitelty eri auralisointimenetelmiä sekä reaaliaikaisten vuorovaikutteisten järjestelmien vaatimuksia. Toteutetun järjestelmän yleiskuvauksen jälkeen on esitelty laskentaparametrien interpolointeja, joita tarvitaan, jotta dynaamisen järjestelmän tuottama signaali olisi jatkuvaa. Äänilähteen, tilan akustiikan ja kuuntelijan mallintamisessa käytetyt menetelmät on käyty yksitellen läpi niin teorian kuin toteutuksenkin kannalta. Tapaustutkimuksena tässä työssä on ollut Marienkirche-konserttisali, josta on tehty virtuaaliääniympäristön sisältävä demonstraatiovideo. Työn tuloksia on käytetty hyväksi DIVA-järjestelmässä (Digital Interactive Virtual Acoustics), jonka tavoitteena on luoda täysin virtuaalinen konserttielämys mallintamalla sekä soittimia, soittajia että tilan akustiikkaa.		
Avainsanat:	virtuaaliakustiikka, auralisointi, kuvalähdemenetelmä, digitaalinen signaalinkäsittely, virtuaalitodellisuus, huoneakustiikka, akustiikan laskennallinen mallintaminen, virtuaaliääniympäristö	

Author:	Tapio Lokki	
Name of the Thesis:	Implementation of Virtual Acoustics for a Computational Concert Hall Model	
Date:	December 15, 1997	Number of pages: 76
Department:	Electrical and Communications Engineering	
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing	
Supervisor:	Professor Matti Karjalainen	
Instructor:	Lic. Tech. Lauri Savioja	
In this thesis, a system that produces a virtual acoustic environment for any modeled space is implemented. The virtual acoustic environment can be produced by modeling the sound source, room acoustics and the listener and can be listened to through headphones or loudspeakers. The thesis starts with an overview of the methods of computational room acoustics, which approximate the behaviour of sound in modeled space. In this work, a time domain hybrid method consisting of the image-source method and artificial reverberation is used to obtain a real-time interactive system. The fundamentals and implementation aspects of the image-source method are introduced. Also the requirements for the real-time interactive auralization process are presented. In a real-time interactive virtual acoustic environment the interpolation of all varying calculation parameters is needed to obtain a continuous output. The interpolation methods used are introduced and a presentation of the modeling methods for sound sources, room acoustics and the listener is given. An application of the realized system is the model of a concert hall named Marienkirche – demonstrated with an animated video. The results presented in this thesis have been applied in DIVA-project (Digital Interactive Virtual Acoustics), which aims at producing an extreme virtual experience with modeled musical instruments, players and the room acoustics.		
Keywords:	virtual acoustics, auralization, image-source method, digital signal processing, virtual reality, modeling of room acoustics, virtual auditory environment	

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty osana NetVE-tavoitetutkimushanketta (Networked Virtual Environments) sekä DIVA-projektia (Digital Interactive Virtual Acoustics). Projektin vetäjää professori Tapio "Tassu" Takalaa kiitän mielenkiintoisista tutkimusideoista ja kannustuksesta.

Erityiset kiitokset kuuluvat työni ohjaajille, TkL Lauri Saviojalle ja TkL Jyri Huopaniemelle. Ilman Laurin asiantuntevaa ja kärsivällistä apua ohjelmoinnissa ei toteutettu järjestelmä tuottaisi edes virtuaalisia naksahduksia saati sitten virtuaaliääniympäristöjä. Jyriä kiitän erityisesti suodinsuunnitteluun liittyvien ongelmien ratkomisista sekä häneltä saamistani Matlab-rutiineista. Lisäksi tahdon kiittää edellämainittuja työhöni liittyvistä keskusteluista ja rakentavasta kritiikistä.

DI Riitta Väänästä kiitän loistavan jälkikaiunta-algoritmin kehittämisestä sekä mielenkiintoisista jälkikaiuntaan liittyvistä keskusteluista. Tekn. yo Klaus Riedereriä kiitän HRTF:itteni mittaamisesta. Insinööritoimisto Akukon Oy:n akustikkoja kiitän Marienkirche-konserttisaliin liittyvistä tiedoista ja tietokonemalleista. Rakennusarkkitehti Erkki Rouskua kiitän erittäin hienon tietokoneanimaation tekemisestä toteutettuun demonstraatiovideoon.

Kiitokset kuuluvat myös koko DIVA-huoneen porukalle; Ramille, Tommille, Jarmolle ja Napolle, joiden kanssa työskentely ei koskaan ole tylsää ja turhan rauhallista.

Retuperän WBK:ta haluan kiittää siitä, että hyvin alkaneet opintoni eivät päässeet keskeytymään valmistumisen johdosta liian aikaisin. Uudemman ranskalaisen torvimusiikin kautta olen myös tutustunut käytännön akustisiin ongelmiin ja oppinut, että akustiikaltaan hyvissä tiloissa seinät ovat useimmiten sijoitettu huoneen laidoille.

Vanhempiani haluan kiittää innostamisesta musiikin ja tekniikan pariin. Lopuksi haluan lausua mitä rakkaimmat kiitokset avovaimolleni Jutalle tämän työn pilkkujen kohdistamisesta paikoilleen sekä siitä, että hän on saanut minut ajattelemaan myös muutakin kuin virtuaaliääniympäristöjä.

Otaniemessä 10. joulukuuta 1997

Tapio Lokki

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
1.1 Virtuaaliääniympäristö	2
2. Katsaus huoneakustiikan laskennallisiin menetelmiin	4
2.1 Aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvat menetelmät	4
2.2 Geometrisen akustiikan menetelmät	8
2.3 Hybridimenetelmät	9
2.4 Tässä työssä toteutettu menetelmä	10
3. Kuvalähdemenetelmä	11
3.1 Kuvalähdemenetelmän fysikaalinen perusta	11
3.2 Kuvalähdemenetelmän toteutus	13
3.2.1 Kuvalähteiden etsiminen	15
3.2.2 Kuvalähteiden oikeellisuus- ja näkyvyystarkastelut	16
3.3 Kuvalähdemenetelmän puutteet ja rajoitukset	19
4. Auralisointimenetelmien teoriaa	23
4.1 Auralisointi	24
4.2 Reaaliaikainen auralisointi	25
4.3 Vuorovaikutteinen auralisointi	26
5. Virtuaaliääniympäristön toteuttaminen	28
5.1 Kuvalähteiden etsintä	29
5.2 Toteutettu auralisointijärjestelmä	30
5.3 Kuvalähteiden dynaaminen käsittely auralisoinnissa	32
5.4 Äänilähde	38
5.4.1 Äänilähteen suuntaavuus	39
5.5 Siirtotie	40

5.5.1 Seinien heijastuskertoimet	41
5.5.2 Ilman absorptio	43
5.5.3 Jälkikaiunta	45
5.6 Kuuntelija	49
5.6.1 Korvien välisen aikaeron (ITD) toteuttaminen	50
5.6.2 HRTF-suotimien suunnittelu ja toteutus	52
6. Tapaustutkimus: Marienkirche	55
6.1 Siirtotie ja jälkikaiuntalohkon parametrien arvot	55
6.2 Demonstraatiovideo	61
6.3 Reaaliaikaisen järjestelmän suorituskyky	61
6.4 Järjestelmän verifiointi akustisten tunnuslukujen avulla	63
6.4.1 Huoneakustiikan tunnusluvut	63
6.4.2 Lasketut tunnusluvut	64
7. Pohdintoja ja tulevaisuuden suunnitelmia	68
Lähdeviitteet	71

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a	pään säde
a_n	suodinkerroin ($n=0,1,2,\dots$)
A_{ala}	alkiomonopolin pinta-ala
b_n	suodinkerroin ($n=0,1,2,\dots$)
$b(r)$	etäisyydestä riippuva vahvistuskerroin
c	äänien nopeus
c_θ	atsimuuttikulman interpolointikerroin
c_φ	elevaatiokulman interpolointikerroin
d	lähteen etäisyys heijastavasta pinnasta
D	viive
f	taajuus
f_s	näytteenottotaajuus
k	aaltoluku
kp_n	kuuntelupiste n
kl_n	kuvalähde n
K	kertaluku
n_i	i :nnen kuvalähteen kertaluku
n_w	tutkittavan tilan pintojen lukumäärä
n_x, n_y, n_z	ei-negatiivisia kokonaislukuja
$\hat{n}$	yksikkövektori
N_{DL}	viivelinjojen lukumäärä
N_f	suotimien lukumäärä
N_{IS}	kuvalähteiden määrä
M	näkyvyysmatriisi
p	äänipaine
$\vec{p}$	lähteen sijaintivektori

q_0	tilavuusnopeus
r	etäisyys
R	kuuntelupiste
$\vec{R}$	kuvalähteen sijaintivektori
S	alkiomonopoli
S'	alkiomonopolin kuvalähde
s	pinnan etäisyys origosta
t	aika
T_r	jälkikaiunta-aika
z^{-1}	yksikköviive
z^{-dn}	viivelinja, jonka pituus on d (n on indeksinumero)
$Y(\omega)$	akustinen admittanssi
v_n	hiukkasnopeuden normaalikomponentti pinnan suhteen
V_0	alkiomonopolin pinnan hiukkasnopeus
$Z(\omega)$	akustinen impedanssi
$\alpha(\omega)$	energian absorptiokerroin
$\beta(\omega, \gamma)$	taajuudesta ja tulokulmasta riippuva kompleksinen heijastuskerroin
$\delta(t)$	Dirac'n deltafunktio
ε	jälkikaiunta-aikojen suhde
γ	heijastuksen tulokulma
φ	elevaatiokulma
θ	atsimuuttikulma
τ_1	vahvistuskertoimen interpolointikerroin
τ_2	murtoviiveen interpolointikerroin
ω	kulmanopeus
ξ	takaisinkytkentäkerroin
Ψ	nopeuspotentiaali

ASW	äänilähteen auditorinen leveys (engl. apparent source width)
BEM	reunaelementtimenetelmä (engl. boundary element method)
BR	bassosuhde (engl. bass ratio)
BRIR	binauraalinen impulssivaste (engl. binaural room impulse response)
C ₈₀	selvyysluku (engl. clarity)
D/A	digital to analog
DIVA	digital interactive virtual acoustics
EDR	energy decay relief
EDT	aikainen vaimenemisaika (engl. early decay time)
FDN	takaisinkytketty viivematriisi (engl. feedback delay networks)
FDTD	aika-alueen differenssimenetelmä (engl. finite difference time domain)
FEM	äärellisten elementtien menetelmä (engl. finite element method)
FIR	äärellisen impulssivasteen suodin (engl. finite impulse response filter)
G	kokonaisäänipainetaso (engl. strength)
HRTF	head-related transfer function
IACC	korvien välinen ristikorrelaatio (engl. interaural cross correlation)
IIR	äärettömän impulssivasteen suodin (engl. infinite impulse response filter)
ILD	korvien välinen voimakkuusero (engl. interaural level difference)
ITD	korvien välinen aikaero (engl. interaural time difference)
ITDG	initial-time-delay gap
LEF	poikittaisen energian osuus (engl. lateral energy fraction)
LEV	kuuntelijan tilavaikutelma (engl. listener envelopment)
MIDI	musical instrument digital interface
MPEG-4	moving picture expert group
ST	tuenta (engl. stage support)
STFT	lyhyen ajan Fourier-muunnos (engl. short time Fourier transform)
TKK	Teknillinen korkeakoulu

VBAP	vector base amplitude panning
VRML	virtual reality modeling language
WGM	aaltojohtoverkko (engl. waveguide mesh)
WIIR	varpattu äärettömän impulssivasteen suodin (engl. warped infinite impulse response filter)

Yksinkertainen monofoninen äänentoistojärjestelmä ei pysty toistamaan äänen sisältämää tilainformaatiota. Monofonisessa äänisignaaliin voi olla esimerkiksi kaikua, mutta ääni kuuluu vain siitä suunnasta, jossa kaiutin on tai kuulokkeilla kuunneltaessa pään keskipisteestä. Kaksikanavaisella stereofonisella äänentoistojärjestelmällä pystytään luomaan jo tilavaikutelmaa, mutta äänen tulosuunta paikallistuu edelleen vain kaiuttimien väliselle alueelle tai kuulokkeilla kuunneltaessa pään sisään. Ihminen pystyy kuitenkin havaitsemaan myös sivusta ja takaa tulevia ääniä, joiden merkitys on suuri luotaessa mielikuvaa kuuntelijaa ympäröivästä tilasta. Äänentoistojärjestelmää, joka pystyy tuottamaan ääniä kuuntelijan korviin mielivaltaisista suunnista tai kuulokkeilla kuunneltaessa myös pään ulkopuolelta, kutsutaan virtuaaliääniympäristöjärjestelmäksi.

Tämän työn tarkoituksena on ollut toteuttaa virtuaaliääniympäristöjärjestelmä, jonka avulla tietokoneella mallinnettua tilaa voidaan kuunnella. Virtuaaliääniympäristöjen tutkimus on lisääntynyt viime aikoina runsaasti, koska koko audiovisuaalinen teknologia (ääni, valokuvat, video, animaatio, jne.) on yhdistymässä yhdeksi ainoaksi vuorovaikutteiseksi mediaksi, josta on osoituksena kaksi jatkuvasti kehittyvää laajaa standardia; Moving Picture Expert Group (MPEG-4) (ISO/IEC, 1996a) ja Virtual Reality Modelling Language (VRML) 2.0 (ISO/IEC, 1996b). Myös virtuaalitodellisuusjärjestelmissä ja jopa konserttisalien suunnittelussa on kaivattu apuvälinettä, jolla mallinnettua tilaa voitaisiin kuunnella rakentamatta sitä konkreettisesti.

Tässä työssä toteutettu järjestelmä on osa TKK:n tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian sekä akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorioden yhteistä DIVA-tutkimusprojektia (Digital Interactive Virtual Acoustics) (Takala *et al.*, 1996; Diva, 1997; Savioja *et al.*, 1997b). Järjestelmä toimii Silicon Graphics -työasemissa, jotka ovat yhteydessä toisiinsa lähiverkon välityksellä. Koko järjestelmä on ohjelmoitu C++ -kielellä (Stroustrup, 1992). Tutkimuksen päätarkoituksena on luoda täysin virtuaalinen konserttielämys, jota järjestelmän käyttäjä voi ohjata johtamalla tietokonemalleista koostuvaa orkesteria tahti-puikolla. Äänilähteinä DIVA-järjestelmässä käytetään fysikaalisiin soitinmalleihin perustuvia äänisynteesimenetelmiä. Virtuaalisia instrumentteja soittavat animoidut ihmismallit, jotka käyttäjä näkee tietokoneen ruudulla. Tämän työn tarkoituksena on ollut luoda virtuaalinen ääniympäristö konserttisalin laskennalliseen malliin, jossa kyseiset ihmismallit soittavat.

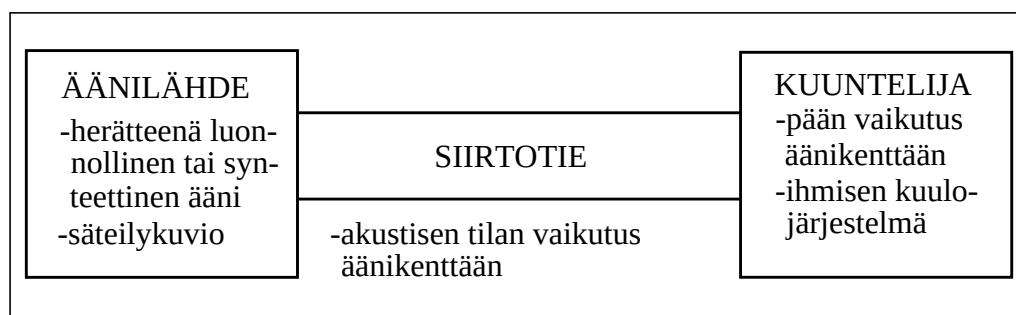
Toteutetun kaltaisia vuorovaikutteisia kokonaisjärjestelmiä, joissa voidaan reaaliajassa liikkua virtuaalisessa konserttisalissa — kuulokuvan muuttuessa katselupaikan ja -kulman mukaan — ei aiemmin ole toteutettu. Joitakin virtuaaliääniympäristön laskentamal-

leja on jo olemassa (Wenzel, 1996), mutta vuorovaikutteinen liikkuminen ei ole niissä mahdollista. Shinn-Cunningham et al. (1997) ovat artikkelissaan esittäneet ajatuksia vuorovaikutteisen virtuaaliääniympäristön toteuttamiseksi, mutta eivät ole toteuttaneet toimivaa kokonaisjärjestelmää. Virtuaalisen ääniympäristön tuottama aistimus on todenmukaisempi, kun virtuaalisessa tilassa voidaan liikkua ja kuuntelijan kuulokuva muuttuu hänen liikkeidensä mukaan.

Kaikki simulaatiot sekä suurin osa toteutetuista ohjelmistoista ovat kirjoittajan tekemiä. Osa auralisointiohjelmistosta sekä kuvalähteiden etsimisen suorittava ohjelmisto ovat TkL Lauri Saviojan tekemiä. Digitaalisuotimien suunnittelurutiinit materiaalien ja ilman absorptioille, samoin kuin HRTF-suotimien suunnittelun on tehnyt TkL Jyri Huopaniemi.

1.1 Virtuaaliääniympäristö

Sekä Wenzelin (1994) että Begaultin (1994) mukaan virtuaaliääniympäristön luomiseen tarvittavat kolme mallinnettavaa pääkomponenttia ovat äänilähde, siirtotie ja kuuntelija (kuva 1.1).



Kuva 1.1: Virtuaaliääniympäristön luomisessa tarvittavat pääkomponentit.

Virtuaaliääniympäristöä luotaessa herätteenä voidaan käyttää mitä hyvänsä luonnollista tai syntetistä ääntä. Olennaista on, että herätteenä käytetty ääni on kaiutonta eli ettei se sisällä äänitystilan akustiikkaa. Luonnollisella äänellä tarkoitetaan ääntä, joka on äänitetty ja muutettu näytteistämällä digitaaliseen muotoon. Synteettinen ääni taas on keinotekoisista ja voidaan esittää parametrisessa muodossa. Äänisynteesimenetelmiä on lukuisia, joista tällä hetkellä ehkä kaikkein kiinnostavimpia ovat akustisiin soittimiin perustuvat fyysiset mallit. Niistä löytyy tietoa ja lisäviitteitä muun muassa Karjalainen *et al.* (1995a) toimittamasta raportista ”Akustisten järjestelmien diskreettiaikaiset mallit ja soittimien mallipohjainen äänisynteesi”. Herätettä syötetään virtuaaliääniympäristön luovaan

järjestelmään äänilähteestä, jonka ominaisuuksiin kuuluu muun muassa säteilykuvio sekä lähteen muoto.

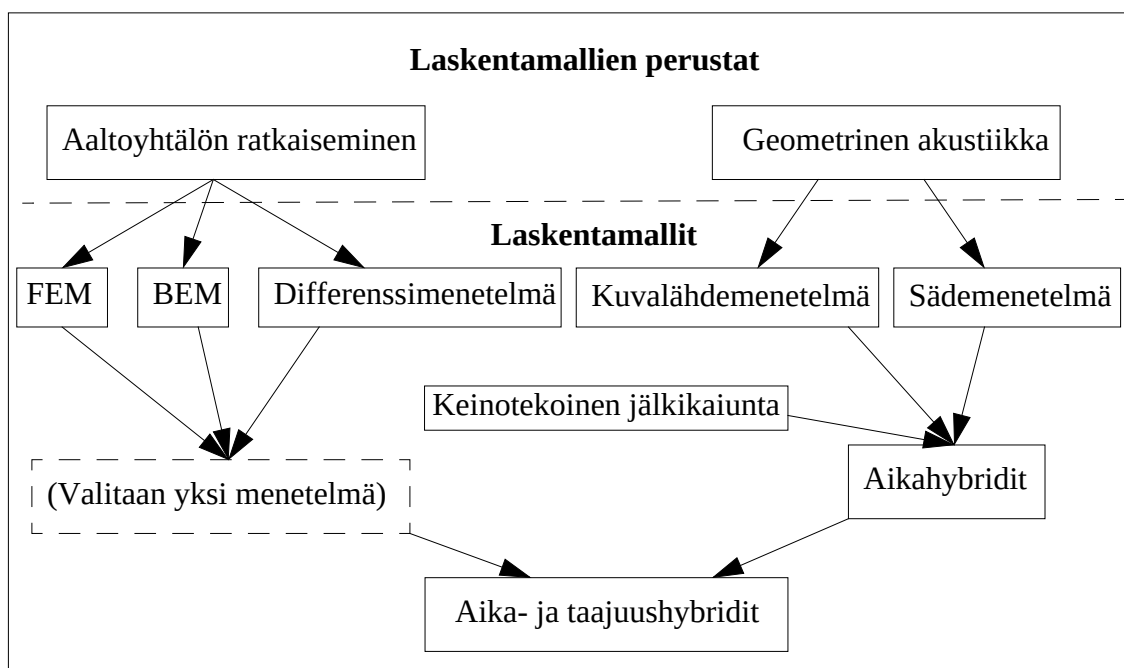
Siirtotiellä tarkoitetaan ympäröivän tilan akustiikkaa. Siihen vaikuttavat esimerkiksi tilan muoto, pintojen akustiset ominaisuudet (absorptio, diffuusio, diffraktio) sekä ilman absorptiosta ja äänilähteen etäisyydestä aiheutuva äänen vaimeneminen. Luvussa 2 käsitellään lyhyesti huoneakustiikan laskennallisia menetelmiä, joilla siirtotietä kuvaavaa siirtofunktiota voidaan laskennallisesti approksimoida. Tässä työssä käytettyä kuvalähdemenetelmää käsitellään tarkemmin luvussa 3.

Laskemalla siirtotien vaikutus äänilähteeseen saadaan monofoninen ääni halutussa virtuaalisen tilan pisteessä. Tällä tavoin prosessoidusta äänestä ei kuitenkaan voida havaita äänilähteen sijaintia sitä ympäröivässä tilassa. Kun ääni käsitellään vielä ihmisen kuulojärjestelmä huomioon ottaen, tilantunnon aistimus voimistuu, ja äänilähteen sijainti voidaan havaita. Suuntakuulon mallintamisessa käytettävät menetelmät on kehitetty tutkimalla eri suunnista tulevien äänten havaitsemista. Suuntakuulo perustuu kahteen havaittuun korvien väliseen eroon, joita ovat tietystä suunnasta saapuvan äänen aikaero (ITD, interaural time difference) ja voimakkuusero (ILD, interaural level difference) (Blauert, 1983). Nämä molemmat korvien väliset erot sisältyvät HRTF-siirtofunktioihin (HRTF, head-related transfer function). HRTF on siirtofunktio, joka kuvaa äänen käyttäytymistä vapaassa kentässä lähdepisteestä korvakäytävään tai sen suulle, ottaen huomioon korvanlehtien, pään ja ylävartalon vaikutukset. Samasta lähdepisteestä saadaan siis kaksi HRTF:ta, kummallekin korvalle erikseen. Sisällyttämällä HRTF:t mukaan virtuaalisen ääniympäristön laskentaan saadaan kuulohavainto todenmukaisemmaksi.

Auralisoinnilla tarkoitetaan keinotekoisien kolmiulotteisten äänikuvan toteuttamista mallintamalla äänilähdettä, tilan akustiikkaa ja suuntakuuloa (Kleiner *et al.*, 1993). Auralisoinnin tarkoituksena on prosessoida ääntä siten, että kuuntelijalle syntyy mielikuva sekä mallinnettavasta tilasta että äänilähteen sijainnista. Auralisointimenetelmien yleistä teoriaa käsitellään tarkemmin luvussa 4.

Luvussa 5 käydään läpi tässä työssä toteutettu algoritmi virtuaaliääniympäristön luomiseksi. Äänilähteen, siirtotien ja kuuntelijan mallintamisessa käytettyjä algoritmeja ja toteutuksia käsitellään erikseen. Esimerkkikonserttisalinä tässä työssä käytettiin vanhaa goottilaista katedraalia, Marienkircheä (kuvat 3.7b ja 6.1), jota ollaan parhaillaan jälleenrakentamassa 1200-paikkaiseksi konserttisaliksi (Marienkirche, 1997). Luvussa 6 esitellään tähän saliin luodun virtuaaliääniympäristön laskentaparametrit sekä tarkastellaan järjestelmän tuottamien tulosten luotettavuutta. Luvussa 7 pohditaan järjestelmän parantamista sekä mahdollisia jatkotutkimuksen aiheita.

Huoneakustiikan laskennallisessa mallinnuksessa on yleisesti käytössä kaksi erilaista lähestymistapaa: aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvat menetelmät ja geometriseen akustiikkaan pohjautuvat mallit. Savioja (1995) on jakanut laskentamallit ja niiden perustat kuvan 2.1 osoittamalla tavalla. Näistä aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvat menetelmät sopivat parhaiten pienille taajuuksille, kun taas geometrisen akustiikan mallit ovat parhaimmillaan suurilla taajuuksilla.



Kuva 2.1: Huoneakustiikan laskentamallien perusteet ja jaottelu (Savioja, 1995).

2.1 Aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvat menetelmät

Ääni on aaltoliikettä, jonka käyttäytyminen ilmassa tunnetaan, ja jolle voidaan muodostaa matemaattinen malli. Yksittäiset ääniaallot muodostavat yhdessä äänikentän, joka voidaan matemaattisesti kuvata differentiaaliyhtälöllä. Häviöttömässä väliaineessa, vapaassa kentässä äänen eteneminen noudattaa aaltoyhtälöä

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

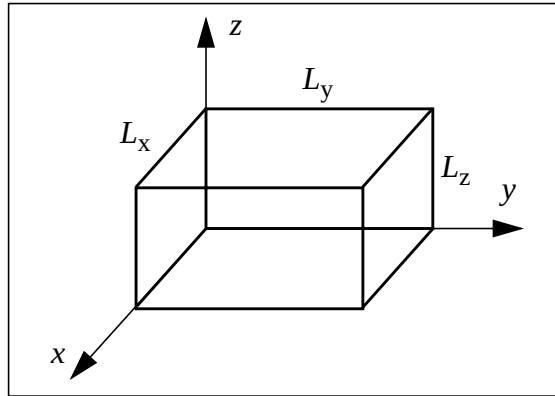
2. Katsaus huoneakustiikan laskennallisiin menetelmiin

missä c on äänen nopeus, p on äänipaine ja t on aika. Tämä yhtälö tunnetaan nimellä Helmholtzin yhtälö (Kuttruff, 1991).

Huoneakustiikassa aaltoyhtälön ratkaiseminen vapaassa kentässä ei ole mielekäästä, koska tutkittavaa tilaa rajoittaa aina joukko pintoja, kuten seinät, lattia ja katto. Ne asettavat aaltoyhtälölle reunaehtoja, jolloin ratkaisun löytäminen on vaikeampaa. Matemaattisesti tarkkoja malleja on kehitetty vain ideaalisille pinnoille, esimerkiksi täysin jäykälle ja kovalle pinnalle. Tällaisen pinnan akustinen impedanssi on ääretön. Pinnan akustinen impedanssi määritellään seuraavasti (Kuttruff, 1991)

$$Z = \frac{p}{v_n} \quad (2.2)$$

missä v_n on hiukkasnopeuden normaalikomponentti pinnan suhteen.



Kuva 2.2: Kovapintainen huone, jonka mitat ovat L_x , L_y , ja L_z .

Aaltoyhtälö voidaan ratkaista analyyttisesti, mikäli tutkittava tila on suorakulmainen ja kovapintainen. Tässä esitettävä ratkaisu perustuu Kuttruffin (1991) esittämään ratkaisuun. Helmholtzin yhtälö voidaan esittää aikariippumattomassa muodossa eli olettaen, että paine ja hiukkasnopeus käyttäytyvät harmonisesti. Tällöin yhtälö (2.1) esitetään muodossa

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (2.3)$$

missä aaltoluku $k = \omega/c$ ja $\omega = 2\pi f$.

2. Katsaus huoneakustiikan laskennallisiin menetelmiin

Edelleen oletetaan, että tutkittava tila (kuva 2.2) on suorakulmainen ja pinnat ovat paikallisesti reagoivia¹, jolloin edellinen yhtälö voidaan esittää karteesisessa koordinaatistossa seuraavasti:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (2.4)$$

Tästä yhtälöstä muuttujat voidaan separoida, jolloin saadaan kolme osatekijää, jotka ovat vain yhdestä koordinaatista riippuvia funktioita.

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \text{ ja} \quad (2.5)$$

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (2.6)$$

Jos osatekijät $p_1(x)$, $p_2(y)$ ja $p_3(z)$ sijoitetaan aaltoyhtälöön (2.3), saadaan kolme erillistä differentiaaliyhtälöä.

Esimerkiksi $p_1(x)$ saadaan yhtälöstä

$$\frac{d^2}{dx^2} p_1(x) + k_x^2 p_1(x) = 0 \quad (2.7)$$

Vastaavasti myös reunaehdot voidaan separoida. Reunaehdoksi asetetaan hiukkasnopeuden normaalikomponentin häviäminen rajapinnalla, koska jäykän pinnan akustinen impedanssi on ääretön.

$$\frac{d}{dx} p_1(x) = 0 \text{ kun } x = 0 \text{ tai } x = L_x \quad (2.8)$$

Vastaavalla tavalla saadaan yhtälöt $p_2(y)$:lle ja $p_3(z)$:lle. Yhtälöllä (2.7) on yleinen ratkaisu, joka on muotoa

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad (2.9)$$

missä A_1 ja B_1 ovat vakioita, joita käytetään sovittamaan ratkaisu annettuihin reunaehtoihin (yhtälö (2.8)). Yhtälöstä (2.9) nähdään, että vakio B_1 :n tulee olla nolla, jotta $p_1(x)$ täyttää yhtälön (2.8) asettaman ensimmäisen reunaehdon ($x = 0$). Reunaehto toisella rajapinnalla ($x = L_x$) täyttyy, kun $\cos(k_x L_x) = \pm 1$, jossa $k_x L_x$ on π :n monikerta. Tällöin k_x :n arvot saadaan yhtälöstä

1. Paikallinen reagointi = Pinnan akustinen impedanssi on riippumaton saapuvan äänen tulokulmasta, mikäli hiukkasnopeuden normaalikomponentti riippuu vain äänipaineesta tarkasteltavan pintaelementin edessä, eikä äänipaineesta viereisten pintaelementtien edessä (Kuttruff, 1991).

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad (2.10)$$

missä n_x on ei-negatiivinen kokonaisluku. Vastaavasti saadaan yhtälöt k_y :lle ja k_z :lle. Sijoittamalla k_x , k_y ja k_z yhtälöön (2.6) saadaan

$$k = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (2.11)$$

mistä voidaan laskea aaltoyhtälön ominaisarvot ja niistä edelleen tutkittavan tilan ominaisaajuudet ($f = (kc)/(2\pi)$). Aaltoyhtälön ratkaisu halutussa pisteessä on täten muotoa

$$p(x, y, z) = C \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (2.12)$$

missä C on mielivaltainen vakio. Yhtälö (2.12) ei ole vielä täydellinen äänikentän kuvaus halutussa pisteessä, koska yhtälön johdossa ei ole huomioitu äänikentän aikariippuvuutta. Se voidaan ottaa huomioon kertomalla yhtälö (2.12) vielä $e^{j\omega t}$:llä, jolloin saadaan äänipaineen arvo halutussa pisteessä hetkellä t .

Edellä esitetty ratkaisu pätee siis vain ideaalisissa olosuhteissa ja suorakulmaisessa tilassa. Oikeissa tiloissa, joiden geometria on monimutkaisempi, ja joiden seinillä on äärellinen impedanssi, on aaltoyhtälön ratkaiseminen analyttisesti mahdotonta. Aaltoyhtälölle voidaan kuitenkin löytää numeerisia ratkaisuja menetelmillä, joista yleisimpiä ovat äärellisten elementtien menetelmä (FEM, finite element method) ja reunaelementtimenetelmä (BEM, boundary element method) sekä differenssimenetelmät kuten aika-alueen differenssimenetelmä (FDTD, finite difference time domain). Elementtimenetelmillä laskeaan yleensä aaltoyhtälöä taajuusalueessa, kun taas differenssimenetelmiä käytetään useimmiten aika-alueessa.

Äärellisten elementtien menetelmässä laskettava tila täytetään eri muotoisilla elementeillä. Niiden koko määrää ylärajataajuuden, jonka yläpuolella aaltoyhtälön käyttäytymistä ei voida enää approksimoida riittävällä tarkkuudella. Reunaelementtimenetelmässä tilan rajapinnat kuvataan elementeillä ja äänen käyttäytyminen lasketaan näillä rajapinnoilla. FEM-malleissa elementtien määrä on kertaluokkaa suurempi kuin BEM-malleissa, mutta toisaalta BEM-mallien käsittely ja ratkaiseminen on huomattavasti vaikeampaa. (Kleiner *et al.*, 1993)

Differenssimenetelmät ovat matemaattisia menetelmiä, jotka voidaan tehokkaasti toteuttaa digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla. Menetelmien lähtökohtana on, että aaltoyhtälö diskretoidaan eli aikaa ja paikkaa käsitellään diskreetteinä. Esimerkiksi aika-alueen dif-

ferenssimenetelmässä voidaan käyttää digitaalisista aaltojohdoista muodostettuja moniulotteisia aaltojohtoverkkoja (WGM, waveguide mesh) kuten Savioja *et al.* (1996) ovat esittäneet. Huoneakustiikan laskemista FDTD:n avulla pienillä taajuuksilla on esitelty myös Botteldooren (1995).

Merkittävin rajoitus aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvissa menetelmissä on muistin ja laskentakapasiteetin suuri tarve. Savioja (1995) on laskenut, että $15 \times 25 \times 30 \text{ m}^3$ tila vaatisi $8,6 \times 10^9$ elementtiä, mikäli äänipainejakauma haluttaisiin selvittää 16 kHz taajuuteen asti. Käytännössä aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvia menetelmiä voidaan käyttää kuitenkin vain pienillä taajuuksilla, jolloin elementtien koko on suurempi ja määrä on pienempi. Toinen laskennallinen ongelma liittyy elementtien reunaehtojen määrittämiseen. Tarkkojen reunaehtojen määrittämiseksi pitäisi tuntea kunkin pintamateriaalin impedanssi sekä taajuuden että äänen tulokulman funktiona. Tällaista kompleksista impedanssia on erittäin vaikea mitata ja mittaustuloksia ei ole yleisesti saatavilla.

Laskennallisesta monimutkaisuudesta huolimatta aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvien laskentamenetelmien käyttö varmasti yleistyy tulevaisuudessa tietokoneiden tehokkuuden kasvaessa.

2.2 Geometrisen akustiikan menetelmät

Geometrisen akustiikan peruslähtökohta on, että äänen aallonpituudeksi oletetaan lähes nolla. Tällöin ääni käyttäytyy säteittäisenä, kuten valo, ja äänen aaltoluonne jätetään huomioimatta. Tässä työssä tällaisia säteitä kutsutaan äänisäteiksi. Geometrisen akustiikan laskentamenetelmät eivät ota huomioon diffraktiota, diffuusiota ja interferenssiä, jotka aiheutuvat äänen aaltoluonteesta. Geometrisen akustiikan laskentamenetelmiä on yleisesti käytössä kaksi, säde- ja kuvalähdemenetelmä.

Sädemenetelmä (engl. ray-tracing) on käytetyin akustiikan laskentamenetelmä tietokoneavusteisessa akustiikan suunnittelussa. Sädemenetelmällä lasketaan yleensä oktaavi- tai terssikaistoittaisia akustisia tunnuslukuja, mutta reaaliaikaiseen tulosten auralisointiin sädemenetelmällä ei vielä koneiden rajallisen laskentakapasiteetin takia kyetä. Sädemenetelmän suosio perustuu siihen, että menetelmää on tutkittu ja kehitetty runsaasti tietokonegrafiikassa. Kun lasketaan äänienergian vaimenemiseen perustuvia akustisia tunnuslukuja, sädemenetelmä mahdollistaa myös useiden fysikaalisten akustisten ilmiöiden, kuten esimerkiksi seinien absorption ja diffuusion sekä ilman absorption mallintamisen.

Sädemenetelmässä lähetetään yleensä pistemäisestä lähteestä joukko äänisäteitä, joiden etenemistä seurataan tutkittavassa tilassa. Säteet heijastuvat tilan rajapinnoista peiliheijastuksina. Rajapinnalla säteen energiaa voidaan vähentää pinnan akustisten ominaisuuksien mukaan. Tulosten keräämiseksi tilaan sijoitetaan yksi tai useita kuuntelupisteitä, joiden läpi kulkevat äänisäteet rekisteröidään, jolloin saadaan tutkittavan tilan energiavasteet kyseisissä pisteissä. Ensimmäisen merkittävän artikkelin sädemenetelmän käytöstä akustiikan mallintamisessa ovat esittäneet Krokstad *et al.* (1968).

Toinen geometrisen huoneakustiikan laskentamenetelmä on kuvalähdemenetelmä (engl. image-source method). Siinä ääntä käsitellään säteinä, kuten sädemenetelmässä. Äänisäteiden heijastusreitit vastaavat kuvalähteet etsitään peilaamalla oikeaa lähdettä jokaisen pinnan suhteen. Näin saadaan kaikki mahdolliset varhaiset heijastukset mukaan laskentaan, mutta esimerkiksi diffuusien heijastusten toteuttaminen on hyvin hankalaa. Tämän vuoksi kuvalähdemenetelmää käytetään yleensä yhdessä jonkin diffuusia jälkikaiuntaa tuottavan algoritmin kanssa (Vian ja Martin, 1992; Jot *et al.*, 1995).

2.3 Hybridimenetelmät

Kahden tai useamman laskentamenetelmän hybridejä voidaan tehdä joko aika- tai taajuusalueessa. Aika-alueen hybridejä on kahta perustyyppiä, säde- ja kuvalähdemenetelmien yhdistelmiä sekä kuvalähdemenetelmän ja jonkin jälkikaiunta-algoritmin yhdistelmiä. Ensimmäisessä yhdistelmätyypissä sädemenetelmän avulla etsitään kuvalähteitä. Menetelmällä löydetään oikeat kuvalähteet huomattavasti pienemällä työllä kuin käytettäessä kuvalähdemenetelmää, tosin kaikkien kuvalähteiden löytymistä ei voida taata. Toisessa yhdistelmätyypissä lasketaan varhaiset heijastukset kuvalähdemenetelmällä ja niiden jälkeen syntyviä heijastuksia jollakin diffuusia jälkikaiuntaa tuottavalla algoritmilla.

Aika-alueen hybrideissä monet laskentamenetelmät pohjautuvat geometriseen akustiikkaan, jonka lait eivät päde pienillä taajuuksilla. Näin ollen luonnollinen tapa olisi mallintaa pienten taajuuksien käyttäytymistä jollakin aaltoyhtälön ratkaisemiseen perustuvalla menetelmällä ja suuria taajuuksia geometrisen akustiikan menetelmillä. Tällaisen taajuushybridimenetelmän ovat esitelleet mm. Kleiner ja Granier (1995) tutkiessaan auton sisätilan akustiikkaa, jolloin pienet taajuudet laskettiin FEM-menetelmällä ja suuret taajuudet sädemenetelmällä. Menetelmällä ei kuitenkaan saatu kuuntelukokeissa kovin hyviä tuloksia.

2.4 Tässä työssä toteutettu menetelmä

Tämän työn tarkoituksena on ollut kehittää dynaaminen järjestelmä, jota voidaan käyttää sekä reaaliaikaisena vuorovaikutteisena versiona että tuottamaan demonstraatiota ennalta määrättyihin liikeratoihin. Työn pohjaksi on otettu Saviojan (1995) tekemä ohjelmisto, jossa on käytetty sekä säde- että kuvalähdemenetelmiä. Tähän työhön kuvalähdemenetelmä valittiin siksi, että sen avulla löydetään varmasti kaikki varhaisia heijastuksia edustavat kuvalähteet. Menetelmän monimutkaisuuden ja puutteiden vuoksi on malliin lisättävä keinotekoisia jälkikaiuntaa, jotta koko järjestelmä kuulostaisi luonnolliselta. Toteutettu menetelmä on siis aika-alueessa toimiva kuvalähdemenetelmän ja keinotekoisien jälkikaiunnan hybridimenetelmä.

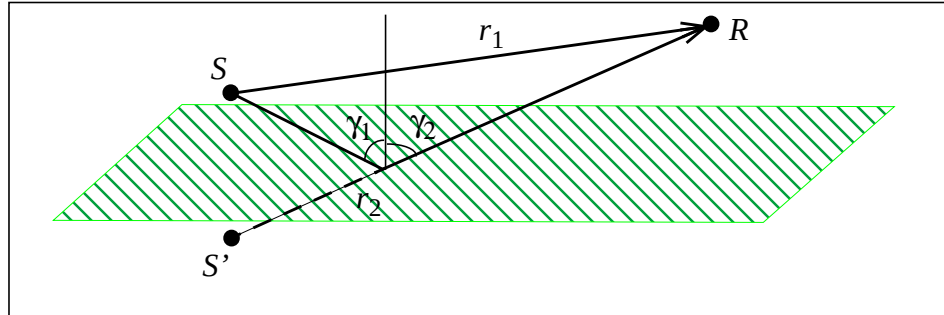
Tässä luvussa esitellään ensin kuvalähdemenetelmän fysikaalinen perusta. Sen jälkeen keskitytään toteutuksessa huomioitaviin seikkoihin ja lopuksi pohditaan menetelmän puutteita ja rajoituksia.

3.1 Kuvalähdemenetelmän fysikaalinen perusta

Äärettömän kokoisen ja täysin jäykän tason lähellä sijaitsevan alkiomonopolin S kenttä voidaan laskea korvaamalla tason aiheuttama heijastus kuvalähteellä, joka on alkiomonopolin peilikuva tason suhteen. Kuvalähde S' on samansuuruinen ja -vaiheinen kuin alkiomonopoli. Uosukaisen (1996) mukaan lähteen ja kuvalähteen aiheuttama nopeuspotentiaali havaintopisteessä R saadaan kaavasta

$$\psi = \frac{q_0}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right) \quad (3.1)$$

missä r_1 on lähteen ja r_2 on kuvalähteen etäisyys havaintopisteestä (kuva 3.1), aaltoluku $k = \omega/c$ ($\omega = 2\pi f$ ja c on äänennopeus) ja tilavuusnopeus $q_0 = V_0 A_{ala}$ (V_0 on alkiomonopolin pinnan hiukkassnopeus ja A_{ala} on alkiomonopolin pinta-ala).



Kuva 3.1: Alkiomonopoli S ja sen kuvalähde S' sekä havaintopiste R .

Tämä yksinkertainen kuvalähdemalli pätee tarkasti vain, kun heijastava taso on ääretön ja täysin jäykkä, jolloin hiukkassnopeuden normaalikomponentti häviää tason pinnalla. Käytännössä taso on aina äärellinen. Kuvalähdemenetelmässä ei huomioida äärellisen tason reunoilla tapahtuvaa diffraktioilmiötä. Jos rajapinta ei ole täysin jäykkä eli rajapinnan impedanssi poikkeaa äärettömästä, kuva-alkiomonopolia, jonka avulla rajapinnan määräämä reunaehto olisi täytetty, ei ole määriteltävissä. Äärellisen impedanssin omaavan

äärellisen tason tapauksessa, kun vielä oletetaan, että kaukokentässä lähteen emittoima palloaalto on likimäärin tasoaalto, voidaan nopeuspotentiaalille käyttää likiarvokaavaa

$$\psi = \frac{q_0}{4\pi r_1} e^{-jkr_1} + \beta(\omega, \gamma) \frac{q_0}{4\pi r_2} e^{-jkr_2} \quad (3.2)$$

missä $\beta(\omega, \gamma)$ on kulmataajuudesta ω ja tulokulmasta γ riippuva kompleksinen heijastuskerroin (Van Maercke, 1986). Morse ja Ingard (1968) ovat johtaneet heijastuskertoimen lausekkeen Greenin funktion ja sen Fourier-integraaliesityksen avulla. Uosukaisen (1996) mukaan Greenin funktio on pistelähteen aiheuttama kenttä, joka perustuu lähdejakauman tuntemiseen.² Morse ja Ingard (1968) ovat johtamisessaan olettaneet heijastuksen peiliheijastukseksi ja heijastavan pinnan paikallisesti reagoivaksi, jolloin heijastuskerroin on muotoa

$$\beta(\omega, \gamma) = \frac{\cos \gamma - Y(\omega)}{\cos \gamma + Y(\omega)} \quad (3.3)$$

Tällöin $Y(\omega) = 1/(Z(\omega))$ on pinnan akustinen admittanssi, jossa $Z(\omega)$ on pinnan akustinen impedanssi. Tarkempia approksimaatioita heijastuskertoimelle ovat esittäneet Delany ja Bazley (1970) sekä Takagi (1990).

Useamman pinnan tapauksessa kuvalähteitä on yksi jokaista pintaa kohden. Van Maercken (1986) mukaan äänipaine havaintopisteessä R saadaan laskemalla yhteen alkupeiräisen lähteen ja jokaisen kuvalähteen emittoimat äänipaineet heijastuskertoimilla painotettuina.

$$p(\omega) = p_0 \sum_i \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \prod_{m=1}^{n_i} \beta_{i,m}(\omega, \gamma_{i,m}) \quad (3.4)$$

missä p_0 on äänilähteen äänipaine, r_i on etäisyys i :nnessä kuvalähteestä havaintopisteeseen, n_i on i :nnessä kuvalähteen kertaluku ja $\beta_{i,m}(\omega, \gamma_{i,m})$ on kyseisen kuvalähteen tuottavan pinnan kompleksinen heijastuskerroin. Kaavan (3.4) avulla voidaan laskea kompleksinen taajuusvaste lähteen ja havaintopisteen välille. Kun vielä oletetaan, että heijastuskerroin $\beta_{i,m}(\omega, \gamma_{i,m})$ on reaalin ja tietyllä taajuuskaistalla vakio, saadaan käänteisen Fourier-muunnoksen avulla yhtälöstä (3.4) systeemin impulssivaste taajuuskais-toittain.

$$h(t) = \sum_i \underbrace{\left[\prod_{m=1}^{n_i} \beta_{i,m}(\omega, \gamma_{i,m}) \cdot \frac{1}{r_i} \right]}_{v_{i1}} \underbrace{\delta\left(t - \frac{r_i}{c}\right)}_{v_{i2}} \quad (3.5)$$

²Greenin funktio, kts. esim. Uosukainen (1996), Morse ja Ingard (1968)

Impulssivasteen kerääminen kaavan (3.5) mukaan on tehokasta, kun lasketaan v_{i1} :n ja v_{i2} :n arvot valmiiksi kahteen taulukkoon.

Kompleksista, sekä taajuudesta että kulmasta riippuvaa heijastuskerrointa $\beta_{i,m}(\omega, \gamma_{i,m})$ on erittäin hankala mitata, joten yleensä käytetään suuntariippumatonta ja reaalista heijastuskerrointa $\beta_{i,m}(\omega)$. Sekä Allen ja Berkley (1979) että Van Maercke (1986) ovat määrittäneet heijastuskertoimen $\beta_{i,m}(\omega)$ energian absorptiokertoimesta $\alpha_{i,m}(\omega) = 1 - \beta_{i,m}(\omega)^2$. Kuttruff (1991) selittää absorptiokertoimen muodostumisen äänen intensiteetin perusteella. Tasoaallon intensiteetti on verrannollinen paineen neliöön, jolloin heijastuneen aallon intensiteetti on $\beta_{i,m}(\omega)^2$ pienempi kuin saapuvan aallon intensiteetti. Toisin sanoen heijastuksessa tulevan aallon energiasta $1 - \beta_{i,m}(\omega)^2$ absorboituu heijastavaan pintaan. Kun energian absorptiokertoimesta ratkaistaan $\beta_{i,m}(\omega)$, saadaan kaavaan (3.5) sopiva heijastuskertoimen lauseke

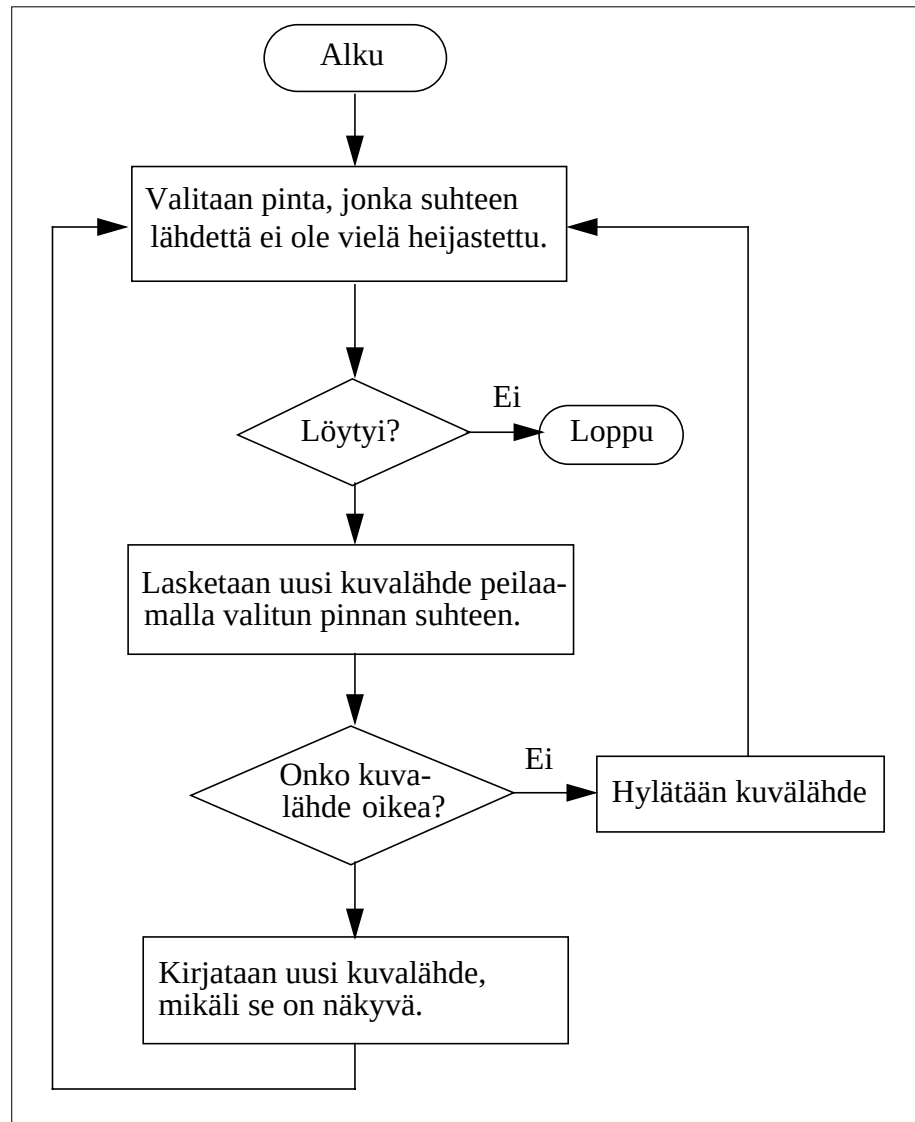
$$\beta_{i,m}(\omega) = \sqrt{1 - \alpha_{i,m}(\omega)} \quad (3.6)$$

missä $\alpha_{i,m}(\omega)$ on heijastavan pinnan energian absorptiokerroin. Kuttruffin (1991) mukaan huoneakustiikassa heijastuskerroin $\beta_{i,m}(\omega)$ voi saada negatiivisia arvoja erittäin harvoin ja silloinkin vain tietyillä taajuusalueilla. Tämän takia kaavassa (3.6) on ainoastaan positiivinen neliöjuuri.

3.2 Kuvalähdemenetelmän toteutus

Kuvalähdemenetelmä perustuu siihen olettamukseen, että kaikki heijastukset ovat peiliheijastuksia. Näin heijastus voidaan korvata heijastavien tasojen vastakkaisille puolille sijoitettavilla kuvalähteillä. Kuvalähteiden löytämiseksi tehdään kaksivaiheinen tarkastelu, jossa ensin etsitään kaikki mahdolliset kuvalähteet ja sitten todetaan niiden oikeellisuus. Savioja (1995) on esittänyt seuraavanlaisen rekursiivisen algoritmin kuvalähteiden etsimiseksi (kuva 3.2):

Algoritmissä etsitään ensin pinta, jonka suhteen lähdettä ei ole vielä heijastettu. Jos pinta löytyy, lasketaan uusi kuvalähde peilaamalla lähdettä valitun pinnan suhteen. Jos uusi kuvalähde todetaan oikeaksi luvussa 3.2.2 esitettyjen ehtojen 1 ja 2 mukaisesti, tehdään sille vielä näkyvyystarkastelu. Kuvalähteen ollessa näkyvä, kirjataan se muistiin jatkokäsittelyä varten ja valitaan uusi pinta.



Kuva 3.2: Algoritmi kuvalähteiden etsimistä varten (Savioja, 1995).

Edellä esitetty algoritmi suoritetaan kaikille tilassa oleville äänilähteille ja sen jälkeen rekursiivisesti aina kullekin löydetylle uudelle kuvalähteelle.

Suorakulmaisessa tilassa kuvalähteiden löytäminen on hyvin helppoa. Kaikki kuvalähteet ovat näkyviä ja ne muodostavat säännöllisen hilan. Saviojan (1995) mukaan laskenta pysytään tällöin tekemään hyvin nopeasti käyttäen vain yhteen- ja vähennyslaskuja. Suorakulmaisen tilan yksinkertaisuutta kuvaa hyvin myös Allen ja Berkleyn (1979) todistus siitä, että häviöttömässä (täysin jäykät pinnat) suorakulmaisessa tilassa aaltoyhtälölle saadaan kuvalähdemenetelmällä tarkka ratkaisu.

Käytännössä mielenkiintoiset tilat eivät kuitenkaan ole suorakulmaisia vaan muodoltaan huomattavasti monimutkaisempia. Tällaisissa tiloissa kuvalähteiden etsimiseen kuluva laskenta-aika moninkertaistuu oikeellisuustarkasteluiden takia.

3.2.1 Kuvalähteiden etsiminen

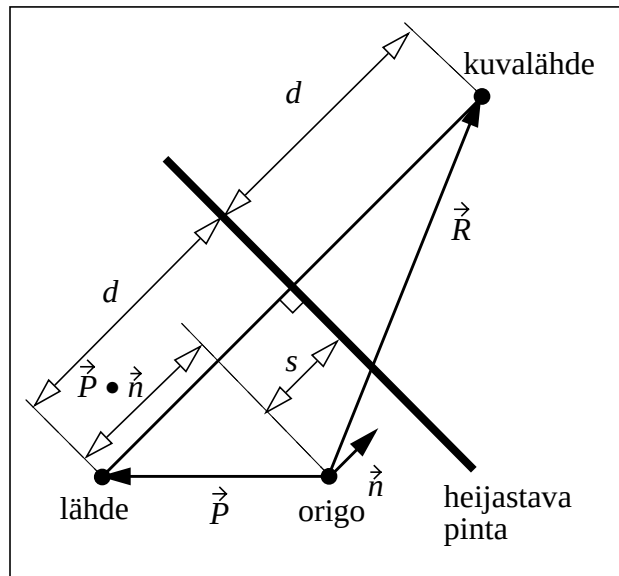
Kuvalähteiden löytämiseksi täytyy äänilähde peilata jokaisen pinnan suhteen. Tasopinnan sijainnin ja orientaation ilmoittamiseen riittää kaksi parametria: yksikkövektori $\vec{n}$, joka on origosta lähtevä ja pintaa vastaan kohtisuorassa oleva vektori sekä etäisyys s , joka on heijastavan pinnan etäisyys origosta. Kuten kuvasta 3.3 nähdään, löydetään kuvalähde $2d$:n etäisyydeltä oikeasta lähteestä yksikkövektorin $\vec{n}$ osoittamasta suunnasta. Lähteen etäisyys pinnasta saadaan kaavasta

$$d = s - \vec{P} \cdot \vec{n} \quad (3.7)$$

missä $\vec{P}$ on lähteen sijaintivektori. Kuvalähteen sijaintivektori $\vec{R}$ saadaan kaavasta

$$\vec{R} = \vec{P} + 2d\vec{n} \quad (3.8)$$

Kuvalähteen löytämiseksi joudutaan siis tekemään huomattavasti enemmän laskutoimituksia kuin suorakulmaisen tilan tapauksessa (Borish, 1984).



Kuva 3.3: Kuvalähteen sijainti saadaan kulkemalla lähteestä matka $2d$ yksikkövektorin $\vec{n}$ suuntaan.

3.2.2 Kuvalähteiden oikeellisuus- ja näkyvyystarkastelut

Jokaiselle lasketulle kuvalähteelle on tehtävä oikeellisuustarkastelu, jonka tarkoituksena on karsia pois sellaiset kuvalähteet, jotka eivät vastaa todellisia heijastuksia. Borish (1984) jakaa tarkastelun kolmeen osaan:

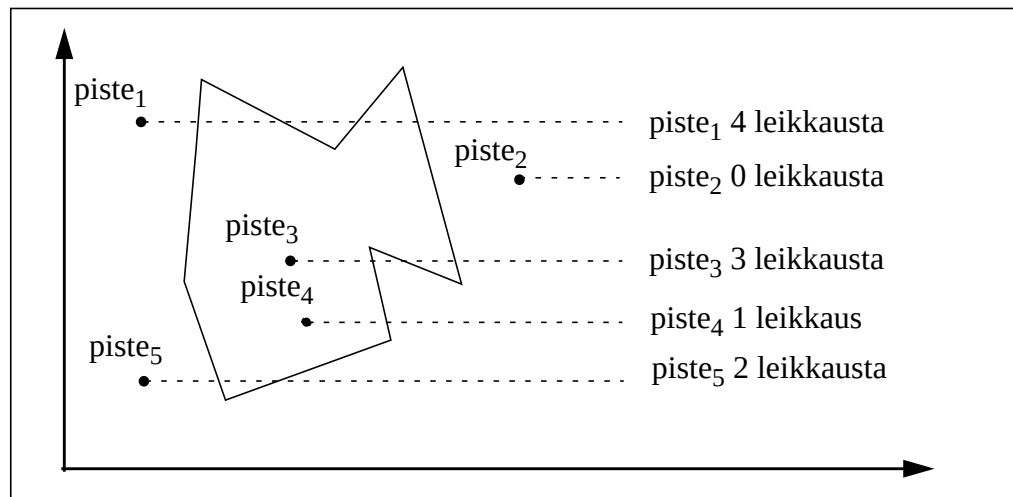
1. Heijastuksen on tapahduttava sellaisen pinnan suhteen, jonka sisäpuoli on heijastettavaan lähteeseen (alkuperäinen tai kuvalähde) päin. Ehto täyttyy, jos laskennassa kaavan (3.7) antama etäisyys pinnasta on positiivinen.
2. Kuvalähteen tulee olla riittävän lähellä kuuntelupistettä. Maksimietäisyys on kuuntelijan määriteltävissä. Etäisyys ehdolla varmistetaan myös kuvassa 3.2 olevan algoritmin rekursion päättyminen. Laskennan lopettamispiste voidaan määrätä myös siten, että mukaan otetaan kuvalähteitä vain tiettyyn kertalukuun asti.
3. Laskennallisesti raskain kriteeri oikeellisuudelle on näkyvyystarkastelu. Kuvalähde on näkyvä vain, jos siitä kuuntelupisteeseen piirretyn säteen reitti kulkee oikeiden pintojen eikä pintojen jatkeiden läpi.

Näistä kolmesta tarkastelutavasta kaksi ensimmäistä määräävät, onko kuvalähde siinä mielessä oikea, että sen tutkimista jatketaan eteenpäin, ja käytetäänkö sitä muodostettaessa uusia kuvalähteitä. Näkyvyystarkastelun avulla päätellään ainoastaan se, mille kuuntelupisteille kuvalähde kirjataan näkyväksi (Savioja, 1995).

Näkyvyystarkastelu suoritetaan muodostamalla suora kuvalähteestä kuuntelupisteeseen. Mikäli suora leikkaa kuuntelupisteestä katsottuna ensimmäisenä pinnan, jonka suhteen kuvalähde on muodostettu, se on näkyvä kuuntelijalle. Leikkauspisteen sijainnin tutkimiseen on useita algoritmeja. Borishin (1984) mukaan yksi suoraviivainen tapa on muodostaa vektorit leikkauspisteestä heijastavan pinnan jokaiseen nurkkaan. Saaduille vektoreille lasketaan pareittain ristitulot, jolloin tuloksena on vektoreita, jotka osoittavat ortogonaaliseen suuntaan lähtövektoreista. Jos lasketut normaalivektorit osoittavat kaikki samaan suuntaan, leikkauspiste on heijastavalla pinnalla. Muussa tapauksessa leikkauspiste on pinnan ulkopuolella, eikä kuvalähde näy kuuntelupisteeseen. Algoritmin laskentaa voidaan nopeuttaa siten, että tutkitaan normaalivektoreiden suuntia sitä mukaan kun niitä saadaan laskettua. Heti kun havaitaan eri suuntaan osoittava vektori, laskenta lopetetaan ja siirrytään tarkastelemaan seuraavaa kuvalähdettä. Ristitulon laskenta vaatii kuusi kertolaskua, joten yhden kuvalähteen tarkastelu vaatii korkeintaan $6v$ kertolaskua, kun

v on heijastavan pinnan nurkkapisteiden lukumäärä. Tämä Borishin (1984) esittämä algoritmi pätee vain konvekseille monikulmioille.

Toisen, huomattavasti tehokkaamman algoritmin leikkauspisteen tutkimiseen on esittänyt Takala (1989). Tässä algoritmista tutkittava monikulmio projisoidaan ensin tasoon, jonka normaali on yhden koordinaattiakselin suuntainen. Taso valitaan sen mukaan, minkä koordinaattiakselin suuntaan monikulmion normaalilla on suurin arvo. Projisointi tehdään yksinkertaisesti jättämällä valitun suunnan koordinaatit kokonaan huomioimatta. Tämän jälkeen tutkittavasta pisteestä vedetään horisontaalinen puolisuora positiiviseen äärettömyyteen. Laskemalla suoran ja monikulmion sivujen leikkausten lukumäärä voidaan päätellä, onko piste monikulmion sisä- vai ulkopuolella. Jos leikkauksia on pariton määrä, on piste sisäpuolella. Muussa tapauksessa se on ulkopuolella (kuva 3.4).

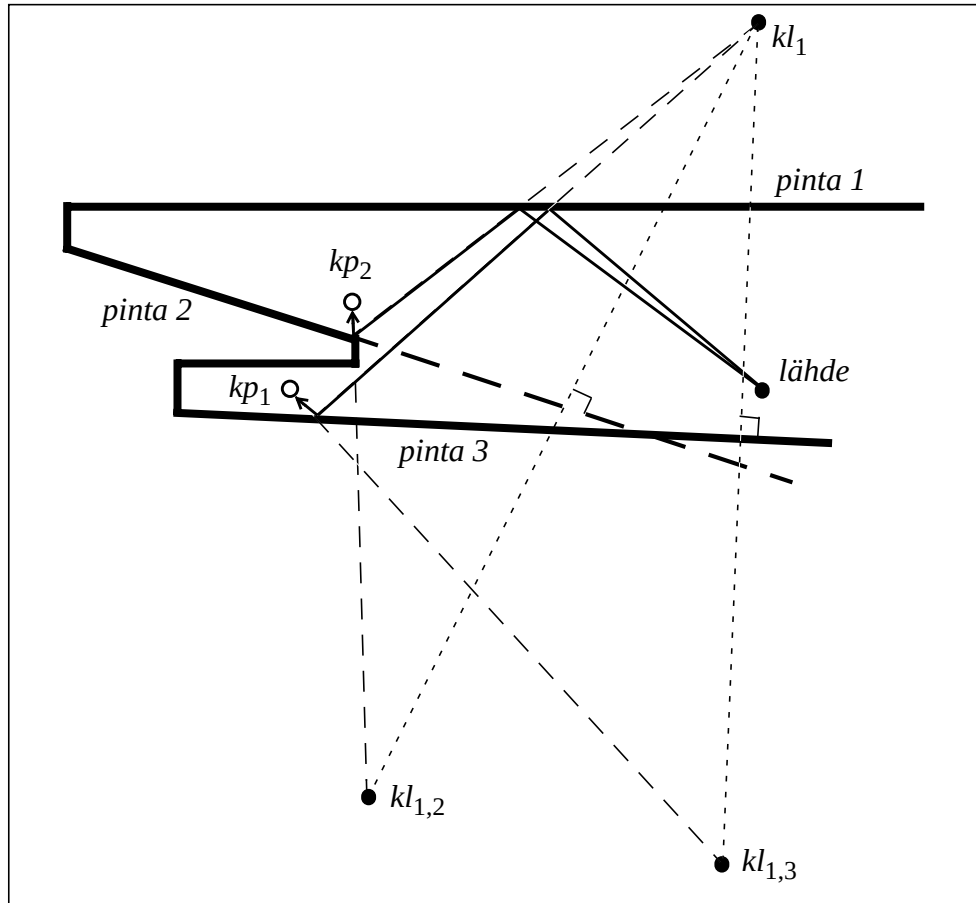


Kuva 3.4: Takalan (1989) esittämä menetelmä, jolla voidaan tutkia onko annettu piste monikulmion sisä- vai ulkopuolella.

Erityistarkastelua vaativat tilanteet, joissa piste on monikulmion reunalla tai piirretty puolisuora leikkaa jonkin nurkkapisteen. Jos algoritmi toteutetaan huolella, nurkkapisteen leikkaaminen ei ole ongelma. Nurkkapisteesähän on kahden reunan päätepisteet eli puolisuora leikkaa molemmat reunat, jolloin leikkauksia on parillinen määrä, mikä ei vaikuta tulokseen. Reunalla olevasta pisteestä näkyvyystarkastelun tekemiseen riittää tieto, että piste on reunalla, jolloin kyseinen kuvalähde on näkyvä. Algoritmin toteuttamiseksi löytyy Saviojan (1995) lisensointityöstä pseudokoodilla toteutettu ohjelma.

Borishin (1984) algoritmi on riittävä vain ensimmäisen kertaluvun kuvalähteille. Korkeamman kertaluvun kuvalähteet vastaavat heijastuksia useammasta pinnasta, joten korkeamman kertaluvun kuvalähteet vaativat lisätarkastelua. Jos seinissä on ulokkeita,

ensimmäisen kertaluvun kuvalähteestä havaintopisteeseen piirretty suora ei välttämättä leikkaa heijastuksessa käytettyä pintaa. Edellä esitettyjen ehtojen mukaan kuvalähde on tällöin väärä, eikä voi simuloida oikeaa heijastusta. Kuitenkin tästä kuvalähteestä muodostettu uusi, toisen kertaluvun kuvalähde voi olla täysin oikea ja simuloida äänisäteiden todellista reittiä. Kuvassa 3.5 on esimerkkitalanteesta.



Kuva 3.5: Esimerkki tilanteesta, jossa kuuntelupiste kp_1 on parvekkeen varjostamalla alueella, jolloin kuvalähde kl_1 ei ole näkyvä kp_1 :lle. kl_1 :stä muodostettu kuvalähde $kl_{1,3}$ on kuitenkin näkyvä kuuntelupisteeseen kp_1 . Kuvalähde $kl_{1,2}$ on taas oikea kuuntelupisteeseen kp_2 , mutta ei kuuntelupisteeseen kp_1 , koska $kl_{1,2}$ on muodostettu parvekkeen yläpinnan suhteen.

Mallinnettavissa tiloissa on usein rakenteita, kuten parveke tai pylväitä, jotka estävät äänisäteiden suoraviivaisen etenemisen. Tällöin jokaiselle kuvalähteelle täytyy tehdä vielä esteellisyystarkastelu. Siinä tutkitaan mahdollisesti esteinä toimivien pintojen ja kuvalähteistä kuuntelupisteeseen piirrettyjen suorien leikkauspisteitä. Kun löydetään suora, joka lävistää esteellisen pinnan, hylätään suoran aiheuttanut kuvalähde. Esteen ollessa äänisäteiden kulkureitillä äänisäde luonnollisesti heijastuu esteestä. Tämä on otettava huo-

mioon eli esteellisten pintojen suhteen on myös muodostettava kuvalähteitä. Kuvassa 3.5 on esimerkki tilanteesta, jossa parveke aiheuttaa esteen äänisäteelle ja samalla parvekkeesta syntyy uusi heijastus.

Mallinnettavissa tiloissa, esim. konserttisaleissa, esteellisiä pintoja on tyypillisesti useita kymmeniä, jopa satoja. Tällöin esteellisyystarkastelu aiheuttaa merkittävää kuormaa laskentaan. Laskennan keventämiseksi Borish (1984) ehdottaa, että mahdolliset esteelliset pinnat merkitään etukäteen. Vielä tehokkaammin laskentakuormaa on kevennetty Savi-ojan (1995) lisensiaatintyössä toteutetussa kuvalähteiden etsintäohjelmassa, jossa käytetään kolmiulotteisia geometrisiä hakemistoja. Niitä käytetään yleisesti paikkatietojärjestelmissä, esimerkiksi maanmittaustekniikassa. Kolmiulotteiset geometriset hakemistot perustuvat tutkittavan tilan säännölliseen osiinjakoon. Näin tila saadaan pilkottua pienempiin suorakulmaisiin särmiöihin ja esteellisyystarkastelua ei tarvitse tehdä kaikkien pintojen suhteen. Riittää kun tarkastellaan mahdollisia esteellisiä pintoja niissä tilavuuksissa, jotka kuvalähteestä kuuntelupisteeseen piirretty suora leikkaa. Geometrinen hakemistojen käytöstä voi lukea lisää esimerkiksi Sametin (1990) kirjasta.

3.3 Kuvalähdemenetelmän puutteet ja rajoitukset

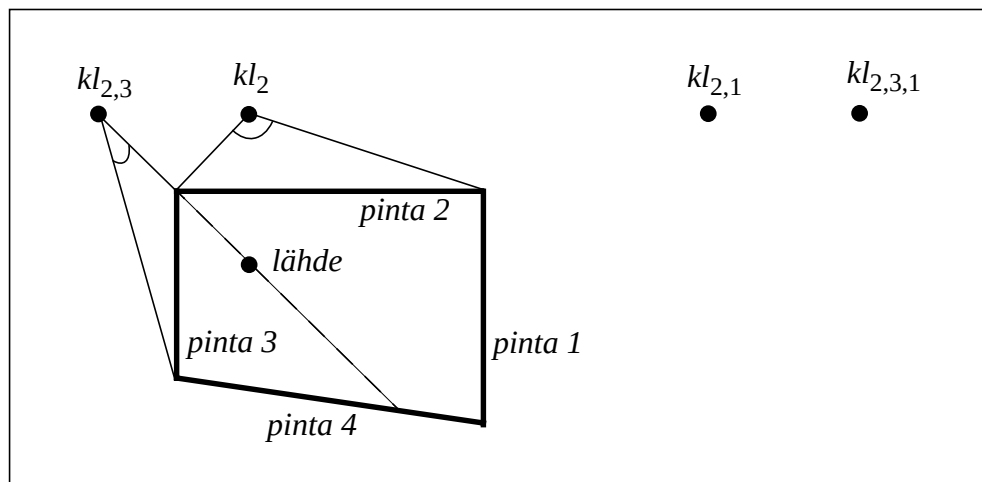
Vorländerin (1989) mukaan mahdollisten kuvalähteiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti seuraavan kaavan mukaan:

$$N_{IS} = \sum_{m=0}^{i-1} n_w (n_w - 1)^m \quad (3.9)$$

missä N_{IS} on mahdollinen kuvalähteiden määrä, n_w on tutkittavan tilan pintojen lukumäärä ja i on kuvalähteiden kertaluku. Kuten kaavasta (3.9) nähdään, kasvaa kuvalähteiden määrä eksponentiaalisesti suhteessa pintojen määrään, jolloin laskentaa rajoittaa tietokoneessa olevan muistin määrä. Jokaisesta kuvalähteestä muistissa on pidettävä useita parametreja: sijaintikoordinaatit (x,y,z) , osoitin edelliseen lähteeseen, etäisyys kuuntelupisteeseen, osoitin pintaan, jonka suhteen kuvalähde on muodostettu sekä muita mahdollisia parametreja. Tyypillisesti tietokoneissa edellä mainituille parametreille varataan kullekin 4-8 tavua muistia. Jokainen kuvalähde tarvitsee siten vähintään 50-100 tavua käyttömuistia. Esimerkkinä voidaan mainita 482 eri pinnasta koostuva tila (kuvassa 3.7b oleva katedraali), jossa muistia tarvittaisiin kaavan (3.9) mukaan $(482+482*481+482*481^2)*100 = 1,12*10^{10}$ tavua eli 11,2 gigatavua, jotta kaikki kuvalähteet saataisiin tutkittua kolmanteen kertalukuun saakka.

Kuten edellä esitetty esimerkki osoittaa, täytyy tutkittavien pintojen määrää vähentää tavalla tai toisella. Yksi tapa on tehdä tutkittavista tiloista yksinkertaisempia malleja, mutta saavutettu hyöty on kyseenalainen; yksinkertaistetun laskentamallin lähtötietojen pitäisi olla mahdollisimman tarkkoja. Toinen huomattavasti parempi ratkaisu on ottaa huomioon oikeellisuustarkastelun ensimmäinen ehto; kuvalähteitä voi muodostua vain pintojen sisäpuolien suhteen. Täten kaikki pinnat, joiden normaalit eivät osoita lähteen puoleiseen puolitason päin, voidaan pudottaa pois tarkastelusta ja laskennallista kuormaa saadaan kevennettyä.

Kristiansen *et al.* (1993) ovat esittäneet tavan, jolla osa tutkittavan tilan pinnoista voidaan eliminoida pois laskennasta. Tämä algoritmi perustuu siihen, että tietyt kuvalähteet eivät vastaa äänisäteiden todellisia heijastusreittejä, eivätkä näin ollen voi olla näkyviä yhteenkään kuuntelupisteeseen. Tällaiset näkymättömät kuvalähteet havaitaan tutkimalla säteilykulmaa, joka muodostuu kuvalähteestä tutkittavan pinnan nurkkiin vedettyjen suorien väliin (kuva 3.6). Jos heijastettava pinta ei näy säteilykulman läpi, ei pinnan suhteen heijastettu kuvalähde voi olla näkyvä yhteenkään kuuntelupisteeseen.



Kuva 3.6: Säteilykulmilla voidaan tutkia kuvalähteiden oikeellisuus. Pinnat 1,3,4 ovat kaikki näkyviä kuvalähteelle kl_2 , koska pinnat ovat säteilykulman sisäpuolella. Pinta 1 taas ei ole näkyvä kuvalähteen $kl_{2,3}$ säteilykulman läpi, joten kuvalähde $kl_{2,3,1}$ ei ole oikea.

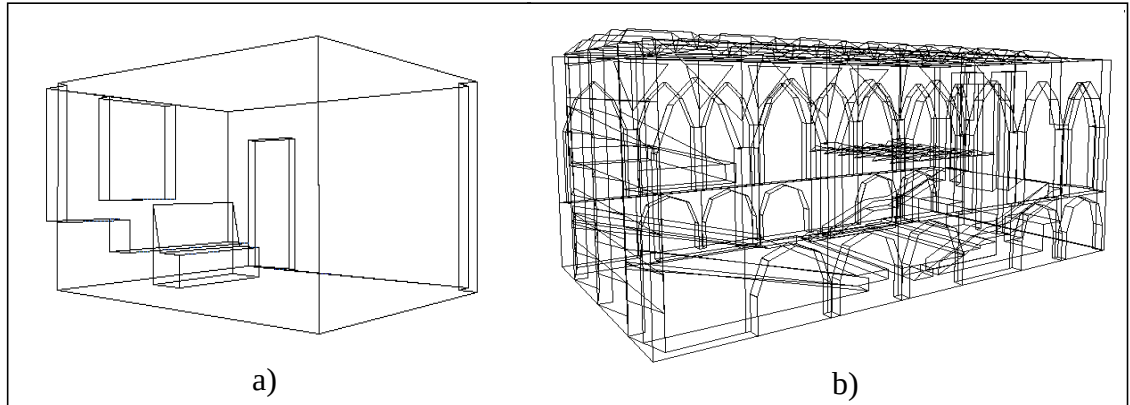
Edellä esitetty algoritmi on pätevä, mutta varsinkin kolmiulotteisissa tiloissa sen toteuttaminen tietokoneohjelmalla on monimutkaista ja laskennallisesti vaativaa. Saviojan (1995) lisensiaatintyössä etsitään säteenseurantaohjelmaa hyväksi käyttäen sellaiset kuvalähteet, jotka eivät todennäköisesti koskaan tule näkyviksi. Säteenseurantaohjelmalla muodostetaan niin kutsuttu näkyvyysmatriisi M , joka sisältää todennäköisyyskertoimet

$M_{l,m}$ (indeksit l ja m ovat pintojen numeroita). Jos näkyvyysmatriisin alkion $M_{l,m}$ arvo on nolla, tarkoittaa se sitä, että pinnat ovat samansuuntaiset tai niiden välillä on jokin este. Näin ollen ensimmäisestä pinnasta l äänisäde ei voi heijastua pintaan m ja siitä edelleen kuuntelupisteeseen. Tällöin pinnan l suhteen heijastettua kuvalähdettä ei tarvitse enää peilata pinnan m suhteen ja laskenta-aikaa sekä muistia säästyy. Näkyvyysmatriisin voisi laajentaa vielä $N:n$ peräkkäisen pinnan heijastuksille. Tämä kasvattaisi luonnollisesti matriisin kokoa, mutta helpottaisi kuvalähteiden laskentaa. Kolmen peräkkäisen pinnan näkyvyysmatriisia ei ole kuitenkaan vielä toteutettu, joten sen vaikutusta on vaikea arvioida (Savioja, 1997a).

Taulukossa 3.1 on esimerkkejä tutkittavien pintojen määristä. Taulukko osoittaa, että näkyvyysmatriisin kanssa yksinkertaisissa huonegeometrioissa, kuten kuunteluhuoneissa, riittää kun tarkastellaan noin 25% pinnoista teoreettiseen maksimimäärään verrattuna, jotta saadaan kaikki kolmannen kertaluvun kuvalähteet tutkittua. Neljännen kertaluvun kuvalähteiden läpikäymiseen riittää, kun tutkitaan hiukan yli 10% pinnoista. Mitä monimutkaisempi mallinnettava tila on, sitä enemmän näkyvyysmatriisista on apua. Esimerkiksi Marienkirche-konserttisalissa (luku 6) riittää kun tutkitaan noin 17% pinnoista, jotta saadaan kaikki toisen kertaluvun kuvalähteet käytyä läpi. Kaikki kolmannen kertaluvun kuvalähteet löydetään, kun tutkitaan noin 4,5% pinnoista.

Taulukko 3.1: Tutkittavien pintojen lukumäärät, joilla saadaan kaikki kyseisen kertaluvun kuvalähteet tutkittua. Molemmissa tiloissa luvut ovat neljän lähdepisteen keskiarvoja. (Simuloinnit tehtiin neljällä lähde- ja 18 kuuntelupisteellä.) Ensimmäinen luku on kyseisen kertaluvun teoreettinen maksimi (kaavasta (3.9)), toinen (kursivoitu ja alleviivattu) luku kertoo pintojen määrän, joiden normaali osoittaa lähteenpuoleiseen puolitasoon päin sekä kolmas (lihavoitu) luku on näkyvyysmatriisin M avulla saatu pintojen lukumäärä.

	Kuunteluhuoneen (kuva 3.7a) tutkittavien pintojen lukumäärät	Marienkirchen (kuva 3.7b) tutkittavien pintojen lukumäärät
1. kertaluku	29/ <u>25</u> / 23	482/ <u>365</u> / 332
2. kertaluku	841/ <u>514</u> / 376	232324/ <u>108930</u> / 39657
3. kertaluku	23577/ <u>9541</u> / 5451	$1,12 \cdot 10^8$ /-/ 5064966
4. kertaluku	660185/ <u>163451</u> / 73312	$5,38 \cdot 10^{10}$ /-/-
5. kertaluku	$1,85 \cdot 10^7$ /-/-	$2,59 \cdot 10^{13}$ /-/-



Kuva 3.7: Kaksi esimerkkigeometriaa. Kuvassa a) olevassa huoneessa on 29 pintaa ja kuvassa b) olevassa katedraalissa on 482 pintaa.

Kuten luvussa 2 todettiin, kuvalähdemenetelmä on geometrisen akustiikan laskentamenetelmä, jossa ääni käyttäytyy säteittäisenä kuten valo, ja äänen aaltoluonne jätetään kokonaan huomioimatta. Lehnertin ja Blauertin (1992) mukaan geometrisen akustiikan menetelmillä voidaan mallintaa vain taajuuksia, joiden aallonpituus on pieni verrattuna tutkittavan tilan pintojen dimensioihin ja suuri verrattuna kyseisten pintojen kaarevuuteen ja epätasaisuuksiin. Toisaalta äänen aaltoluonteesta johtuvia ilmiöitä, jotka kuvalähdemenetelmä jättää huomioimatta, voidaan kompensoida erilaisilla laskennallisilla malleilla.

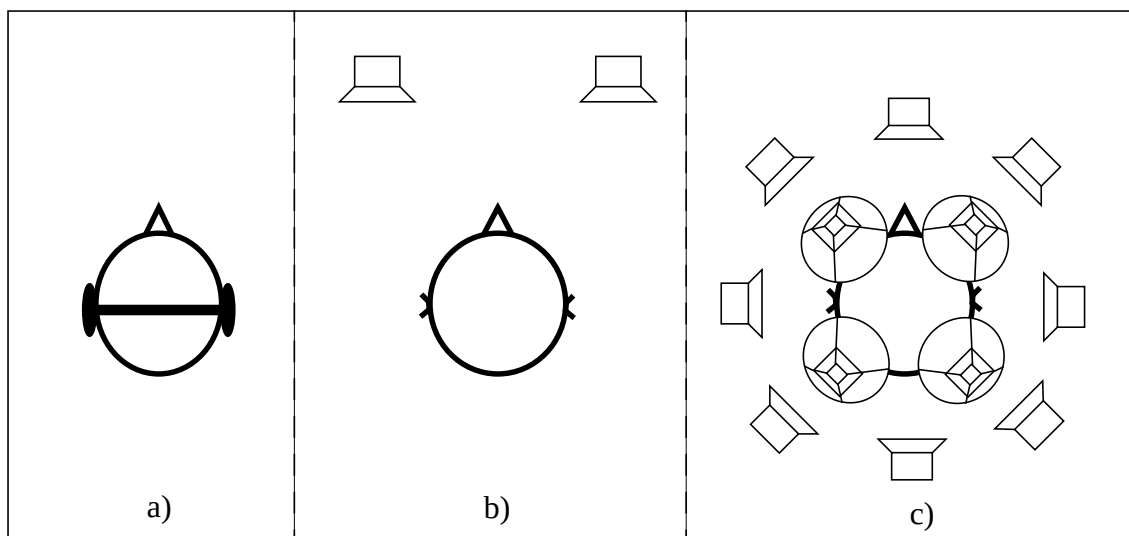
Kaavassa (3.5) lasketaan vain etäisyydestä ja seinien absorptiosta aiheutuva äänienergian vaimentuminen. Laskentamallissa voidaan huomioida myös muita akustisia ilmiöitä. Tällaisia ovat mm. lähteen tai lähteiden suuntaavuusominaisuudet, diffuusit heijastukset, ilman absorptiosta aiheutuva äänienergian vaimeneminen, “seat-dip”-ilmiö sekä äänisäteiden taipuminen eli diffraktio (Dalenbäck, 1995; Iida ja Ando, 1986; Kovitz, 1992).

Edellä luetelluista akustisista ilmiöistä ei tässä työssä ole toteutettu diffraktiota eikä “seat-dip”-ilmiötä, joka ilmenee pienten taajuuksien vaimentumisena katsomon kohdalla. Ilmiö syntyy kun tasavälisen tuolirivistön välit toimivat vaimentavina resonaattoreina (Ando, 1985). “Seat-dip”-ilmiön sisällyttäminen laskentamalleihin olisi hyvin yksinkertaista, jos siitä olisi hyviä mittaustuloksia olemassa. Muiden mainittujen akustisten ilmiöiden huomioimista kuvalähdemenetelmän auralisoinnissa esitellään tarkemmin luvussa 5.

Auralization is the process of rendering audible, by physical or mathematical modeling, the sound field of a source in a space, in such a way as to simulate the binaural listening experience at a given position in a modeled space.

- Kleiner, Dalenbäck, Svensson (1993)

Auralisoinnin tarkoituksena on prosessoida ääntä siten, että kuuntelijalle syntyy mielikuva mallinnettavasta tilasta ja äänilähteen sijainnista. Perinteisellä stereopanoroinnilla tämän toteuttaminen on vaikeaa. Auralisoidun äänen kuuntelemiseksi on kolme tapaa. Binauraalisessa kuulokekuuntelussa (kuva 4.1a) prosessoidaan molemmille korville eri signaalit mallintamalla akustista tilaa ja ihmisen suuntakuulon toimintaa. Kaiutinkuuntelussa (kuva 4.1b) on ongelmana binauraalisten audiosignaalien ylikuuluminen (engl. crosstalk). Ylikuulumisen estämiseksi molemmista kanavista on kompensoitava ristiin kuuluva signaali erillisten suotimien avulla. Huopaniemi käsittelee työssään (1997a) erilaisia ristiinkuulumisenestosuotimia ja niiden suunnittelua.



Kuva 4.1: Auralisoidun äänen kuunteluvaihtoehdot, a) binauraalinen kuulokekuuntelu b) kaiutinkompensoitu binauraalinen kuuntelu ja c) monikanavakaiutinkuuntelu.

Monikanavakuuntelussa (kuva 4.1c) ihmisen suuntakuulojärjestelmän mallia ei tarvitse sisällyttää laskentaan mukaan, koska kuuntelualue on kaiuttimien keskellä. Virtuaalinen äänikuva syntyy, kun simuloituja heijastuksia syötetään ulos eri kaiuttimista. Laskettu keinotekoinen heijastus saadaan kuulumaan myös halutusta pisteestä kaiuttimien välistä, esimerkiksi Pulkin (1997) kehittämällä VBAP-panoroinnilla (VBAP, vector base amp-

litude panning). Se mahdollistaa kaiuttimien mielivaltaisen sijoittelun virtuaalisen äänilähteen paikan tarkkuuden heikentymättä. VBAP on myös laskennallisesti erittäin tehokas. Pulkin (1997) mukaan yhden simuloidun heijastuksen panorointiin siten, että heijastus tulee oikeasta suunnasta, tarvitaan vain kolme kertolaskua.

4.1 Auralisointi

Kleiner *et al.* (1993) mukaan auralisointi voidaan tehdä neljällä eri tavalla, jotka kaikki perustuvat äänilähteen, tilan ja kuuntelijan mallintamiseen joko laskennallisesti tai pienoismalleilla.

1. *Täysin laskennallisessa auralisoinnissa* tutkittavalle tilalle lasketaan yhdellä tai useamman akustiikan laskennallisen menetelmän yhdistelmällä binauraalinen impulssivaste (BRIR, binaural room impulse response). Tätä vastetta konvoluoidaan kaiuttoman herätteen kanssa. Konvoluoinnissa otetaan huomioon kuuntelijan vaikutus äänikenttään yleensä ITD:n ja HRTF-suodatuksen avulla. Kuuntelija voi kuunnella lopputulosta binauraalisesti joko kuulokkeilla tai kaiuttimilla.
2. *Monikanava-auralisoinnissa* tutkittavan tilan binauraalinen impulssivaste lasketaan kuten täysin laskennallisessa auralisoinnissa, mutta konvoluointi tehdään monikanavaisesti, eikä kuuntelijan mallia sisällytetä laskentaan.
3. *Suoran pienoismalliauralisoinnin* menetelmässä tutkittavasta tilasta rakennetaan pienoismalli. Pienoismallissa soimitaan taajuudessa skaalattuja äänisignaaleja, jotka nauhoitetaan keinopään pienoismallin avulla. Ääninäytteiden kuunteleminen tapahtuu joko kuulokkeilla tai kaiuttimilla siten, että nauhoitettuja ääninäytteitä toistetaan pienemmällä näytteenottotaajuudella, jolloin ääninäytteet skaalautuvat oikealle taajuusalueelle.
4. *Epäsuorassa pienoismalliauralisoinnissa* nauhoitetaan pienoismallin impulssivaste ja kuuntelu tapahtuu, kuten täysin laskennallisessa auralisoinnissa, konvoluoimalla herätettä impulssivasteen kanssa. Epäsuoran menetelmän etu verrattuna suoraan pienoismallimenetelmään on siinä, että tilan akustiikkaa voidaan kuunnella useammalla eri herätteellä.

Pienoismalliauralisointi oli aiemmin ainoa auralisointimahdollisuus, mutta laskentamenetelmien ja tietokoneiden kehityksen myötä myös laskennallisia malleja voidaan auralisoida. Pienoismallien rakentaminen on vaikeaa ja hyvin kallista sekä sen muuttaminen on lähes mahdotonta ilman, että rakennetaan uusi malli. Käytettäessä pienoismaalleja myös kaikki akustiset parametrit on osattava suhteuttaa oikein. Xiang ja Blauert (1993) ovat artikkelissaan käsitelleet näitä ongelmia; äänen etenemistä eri väliaineissa, materiaalien absorptiokertoimia sekä lähteen ja keinoäänin pienoismaalleja. Pienillä kaiuttimilla ja mikrofoneilla on usein myös huono signaali-kohinasuhde, koska laitteilta vaaditaan erittäin suurta taajuuskaistaa.

4.2 Reaaliaikainen auralisointi

Kuten edellä on todettu, suoraviivaisin tapa toteuttaa auralisointi on konvoluoida kaiutonta ääninäytettä ja binauraalista impulssivastetta. Jot *et al.* (1995) mukaan suuren konserttisalin impulssivaste on kahdesta kolmeen sekuntia pitkä. Tällaisen vasteen reaaliaikainen konvoluointi aika-alueessa on laskennallisesti vaativaa. Laskentakuorma riippuu muun muassa näytteenottotaajuudesta, HRTF-suotimien asteluvusta sekä impulssivasteen pituudesta. Konvoluointi voidaan tehdä myös taajuusalueessa, jolloin laskuoperaatioiden määrä pienenee merkittävästi, mutta prosessointiviive kasvaa, eikä laskentaa voida tehdä reaaliajassa. Reaaliaikaisen virtuaaliääniympäristön toteutukselle ilman prosessointiviivettä on Jot *et al.* (1995) mukaan kolme vaihtoehtoa:

1. *Konvoluointi aika- ja taajuusalueen yhdistelmällä.* Suodatetaan impulssivasteen alkuosaa aika-alueessa ja jälkikaiun loppuosaa taajuusalueessa Gardnerin (1994) esittämällä algoritmilla, jolla laskenta voidaan suorittaa ilman viiveitä.
2. *Keinotekoinen kaikulaite, jossa käytetään takaisinkytkettyjä digitaalisuotimia.* Varhaiset heijastukset simuloidaan FIR-suotimilla (FIR, finite impulse response) ja diffuusi jälkikaiunta toteutetaan IIR-suotimien avulla (IIR, infinite impulse response). Menetelmää käytetään paljon studiotekniikassa tuottamaan äänitteille luonnollista konserttisalikaiuntaa. Menetelmän vaikeutena on saada luonnollisen kuuloinen kaiunta sekä jälkikaiun ajan määrittäminen taajuuden funktiona (Jot, 1992a).

3. *Parametrisen mallinnuksen ja moninopeussuodinpankkitoteutuksen (engl. multirate filter banks) yhdistelmä.* Schoenle *et al.* (1993) menetelmässä lasketaan huoneen impulssivaste taajuuskaistoittain.

Jot *et al.* (1995) päätyivät toteutuksessaan käyttämään takaisinkytkettyjä digitaalisuotimia, joiden avulla he ovat toteuttaneet oman Spatialisateur (1997) kaiuntasimulaattorinsa.

Wenzel (1996) on esitellyt artikkelissaan reaaliaikaisten auralisointijärjestelmien ominaisuuksia. Yleisesti järjestelmät toimivat edellä esitetyn kohdan 2 mukaisesti siten, että muutama heijastus ja keinotekoinen jälkikaiunta pystytään laskemaan reaaliajassa. Kaikki järjestelmät vaativat kuitenkin erillisen signaaliprosessorin tai mahdollisesti jopa tietokoneen, jossa on erikoisrakenteinen arkkitehtuuri.

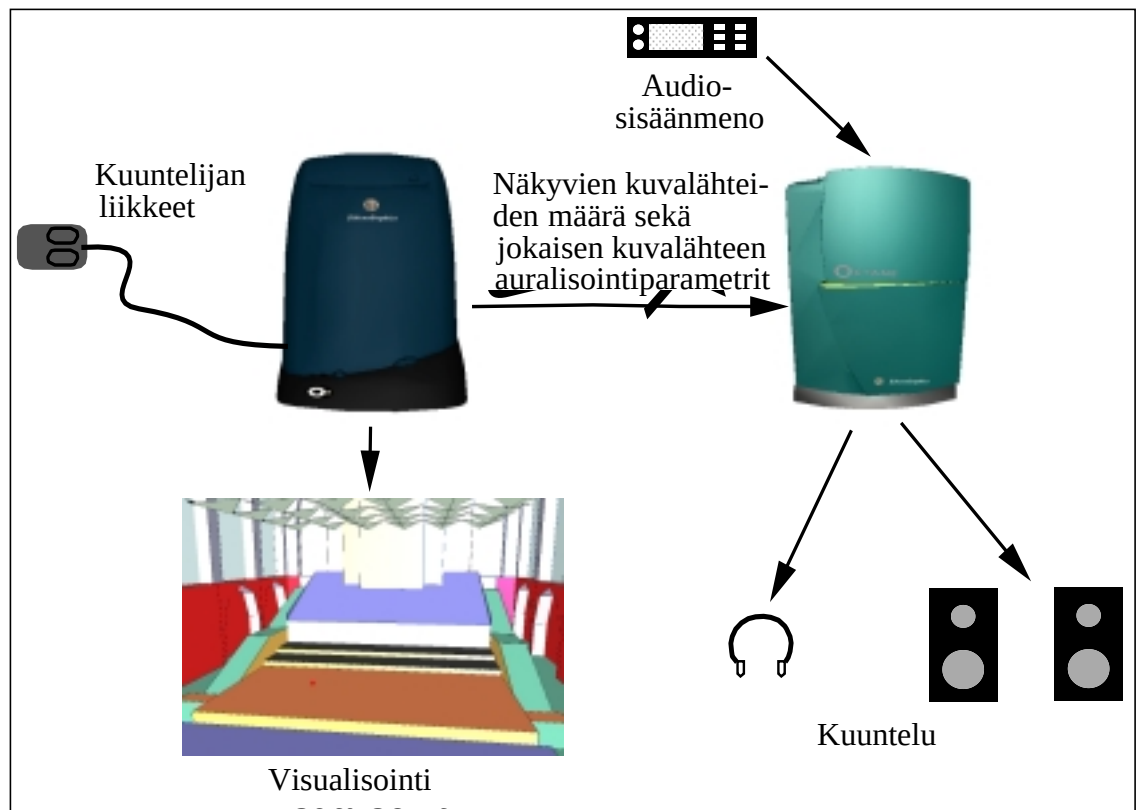
4.3 Vuorovaikutteinen auralisointi

Vuorovaikutteisen järjestelmän kuulohavaintojen on vastattava muita aistihavaintoja. Esimerkiksi päätä käännettäessä korviin saapuvan äänen tulosuunnan on muututtava pään liikkeiden mukaan. Samoin jos mallinnettava virtuaalinen ympäristö muuttuu, tehty muutos on kuultava välittömästi. Muutokset aiheuttavat sen, että koko auralisointijärjestelmä ja sen avulla tuotettu äänikuva muuttuvat sekä kuuntelupaikasta että ajasta riippuvaisiksi. Järjestelmällä tuotetun äänen on kuitenkin oltava jatkuvaa, jolloin nämä muutokset on diskretoitava siten, että niiden päivitystaajuus verrattuna muutoksen suuruuteen on ihmisen kuulojärjestelmän kannalta riittävän suuri. Mallinnettua tilaa ei voida enää kuvata yhdellä impulssivasteella, koska päivitysten välinen aika on lyhyt verrattuna koko impulssivasteeseen. Ongelmaa ei kuitenkaan synny, kun tilan mallinnuksessa käytetään yksittäisiä kuvalähteitä, jotka yhdessä muodostavat koko impulssivasteen. Yksittäisten kuvalähteiden impulssivasteet ovat lyhyitä, joten niitä voidaan käsitellä aika- ja paikka-riippumattomina yhden päivitysjakson aikana. Koska ihmisen kuulojärjestelmä yhdistää yksittäisten kuvalähteiden simuloimat heijastukset, säilyy koko auralisointijärjestelmä lineaarisena (Lehnert ja Blauert, 1992).

Sandvad (1996) on tutkinut ihmisen suuntakuulon tarkkuutta ja reaktioaikaa äänilähteen sijainnin päivitystaajuuden ja latenssin eli järjestelmän aiheuttaman kokonaisviiveen funktiona. Hänen tutkimustensa mukaan 20 Hz:n päivitystaajuudella ihmisen suuntakuulon tarkkuus ja reaktioaika eivät kärsi, ja ihminen sietää runsaat 60 ms latenssia kuulohavaintojen heikentymättä. Päivitystaajuuden vaikutuksesta ja latenssiajoista vuorovaikutteisissa virtuaaliääniympäristöissä on kirjoittanut myös Wenzel (1997). Hän

on pohtinut artikkelissaan muun muassa järjestelmän sisäisen viiveen ja kokonaislatenssin käsitteitä.

Toteutetun järjestelmän yleiskuvaus on kuvassa 5.1. Järjestelmä perustuu täysin laskennalliseen auralisointimenetelmään, jossa lasketaan kuvalähdemenetelmällä varhaiset heijastukset sekä tuotetaan keinotekoisella jälkikaiunta-algoritmilla diffuusi jälkikaiunta. Käytännössä implussivastetta ei siis lasketa etukäteen, kuten Kleiner *et al.* (1993) ehdottavat, vaan impulssivastetta lasketaan aika-alueessa paloittain (suora ääni, kuvalähteet ja diffuusi jälkikaiunta) aina kun kuuntelijan sijainti muuttuu. Näistä paloista suora ääni ja kuvalähteet ovat aikariippuvia, kun taas diffuusia jälkikaiuntaa tuottava lohko on aikariippumaton. Kun aikariippuvia osia interpoloidaan jokaiselle näytteelle, voidaan konvoluutio herätteen kanssa toteuttaa siten, että järjestelmästä ulostuleva signaali on jatkuvaa.



Kuva 5.1: Toteutetun järjestelmän yleiskuvaus.

Järjestelmän käyttäjä voi hiiren avulla liikkua mallinnetussa konserttisalissa. Tietokone, joka laskee visualisoidun grafiikan, etsii myös näkyvät kuvalähteet, joiden tiedot kone lähettää lähiverkon välityksellä auralisoinnin toteuttavalle tietokoneelle (luku 5.1). Nämä parametrit ovat kullekin kuvalähteelle seuraavat: indeksinumero, etäisyys kuuntelupisteestä, orientaatio kuuntelijan suhteen (atsimuutti- ja elevaatiokulma) sekä tiedot seinistä, joiden suhteen kuvalähteet on muodostettu. Auralisointiparametrien päivitystaajuus on 20

Hz, josta aiheutuu enimmillään 50 ms viive. Järjestelmän kokonaisviive, eli aika joka kuulu hiiren liikkeestä kuulokuvan muuttumiseen, on enimmillään 100 ms, koska audiosignaalia lasketaan 50 ms jaksoissa (luku 6.3).

5.1 Kuvalähteiden etsintä

Kuvalähteet ja niiden sijainnit lasketaan Saviojan (1995) toteuttamalla erillisellä ohjelmalla. Kuvalähteiden etsiminen i :nteen kertalukuun asti tapahtuu luvussa 3 esiteltujen periaatteiden mukaan seuraavasti:

1. Valitaan pinta l , jos sen näkyvyysmatriisin alkio $M_{l,m}$ on nollasta poikkeava (luku 3.3). Tämän pinnan suhteen muodostetaan kuvalähde Borishin (1984) esittämän algoritmin mukaisesti (luku 3.2.1). Jos halutaan tarkastella myös i :nnen kertaluvun heijastuksia, valitaan seuraava pinta m ja muodostetaan uusi kuvalähde käyttäen lähteenä edellä muodostettua $i-1$ kertaluvun kuvalähdettä.
2. Kuuntelupisteestä vedetään suora i :nnen kertaluvun kuvalähteeseen. Kolmiulotteisia geometrisia hakemistoja apuna käyttäen tutkitaan, mihin pintaan tai pinnan jatkeeseen suora osuu ensimmäisenä. Takalan (1989) algoritmia käyttäen tutkitaan, onko havaittu leikkauspiste pinnalla m (kuva 3.4). Kuvalähde merkitään muistiin, jos leikkauspiste on pinnalla m . Tämän jälkeen otetaan $i-1$ kertaluvun kuvalähde, johon vedetään suora edellä lasketusta leikkauspisteestä (pinnalla m) ja tutkitaan jälleen onko uusi leikkauspiste pinnalla l , jonka suhteen $i-1$ kertaluvun kuvalähde on muodostettu.
3. Kuuntelupisteeseen näkyvät kuvalähteet merkitään muistiin ja lähetetään seinien materiaalitietojen kanssa auralisointilohkolle.

Kuvalähteiden etsintä, eli yllä olevat kohdat 1 ja 2, toteutetaan vain ohjelman käynnistytksen yhteydessä. Muuttumattomassa tilassa, jossa äänilähde ei liiku, kerran etsityt kuvalähteet pysyvät paikallaan ja ainoastaan niiden näkyvyydet voivat muuttua. Tällöin äänilähteelle ja kuvalähteille tarvitsee tehdä vain näkyvyystarkastelut ja vain näkyvien ääni- ja kuvalähteiden laskentaparametrit lähetetään auralisointilohkolle.

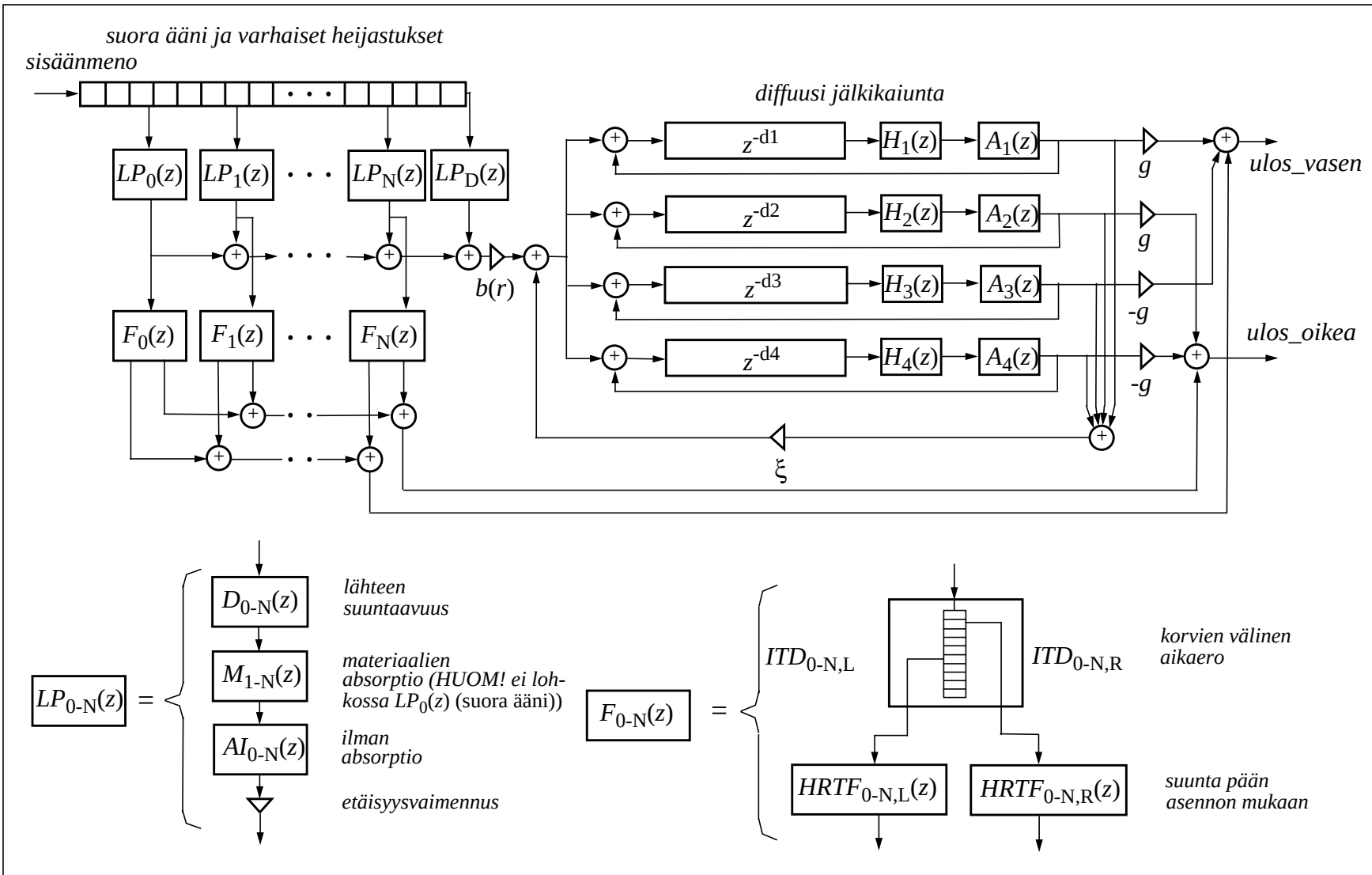
5.2 Toteutettu auralisointijärjestelmä

Toteutetun auralisointijärjestelmän lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.2. Lohkokaavio on toiminnallisesti jaettu kahteen osaan. Vasemmalla on suoran äänen ja varhaisten heijastusten prosessointiin tarkoitetut lohkot ja oikealla on viivelinjoista ja suotimista muodostuva takaisinkytketty lohko, jonka tarkoituksena on tuottaa diffuusia jälkikaiuntaa. Kuvan 5.2 suotimien kertoimet (lohkoissa $LP_{0-N}(z)$ ja $F_{0-N}(z)$) päivitetään kuvalähteitä etsivän ohjelman lähettämien auralisointiparametrien mukaan. Diffuusin jälkikaiun tuottavan lohkon viivelinjojen pituudet ja laskentaparametrit annetaan ohjelmalle erillisessä käynnistystiedostossa. Jälkikaiuntalohkon suotimien $H_{1-4}(z)$ ja $A_{1-4}(z)$ suodinkertoimet lasketaan annetuista parametreista jälkikaiuntalohkon luonnin yhteydessä.

Auralisointijärjestelmä toimii siten, että sisäänmenossa ääninäyte luetaan joko tiedostosta tai tietokoneen audiosisäänmenosta kuvan 5.2 vasemmassa yläkulmassa olevaan viivelinjaan. Sieltä näytteitä poimitaan lohkoihin $LP_{0-N}(z)$ ääni- ja kuvalähteiden etäisyyksistä riippuvien viiveiden mukaan. (Kuvälähteiden dynaamisesta käsittelystä kerrotaan luvussa 5.3.) Lohkoissa $LP_{0-N}(z)$ lasketaan etäisyydestä, seinistä ja ilman absorptiosta aiheutuva taajuusriippuva äänen vaimeneminen. Myös lähteen ominaisuuksia, kuten suuntaavuus, voidaan ottaa tässä lohkoissa huomioon. Lohkojen $LP_{0-N}(z)$ toimintaa käsitellään tarkemmin lähteen ominaisuuksien osalta luvussa 5.4 ja siirtotien ominaisuuksien osalta luvussa 5.5.

Ääni- ja kuvalähteiden etäisyyksien ja ominaisuuksien perusteella viivästetyt sekä suodatetut näytteet (lohkojen $LP_{0-N}(z)$ ulostulot) ovat monofonisia signaaleja. Näistä signaaleista lasketaan lohkoissa $F_{0-N}(z)$ ääni- ja kuvalähteiden sijainnin ja orientaation perusteella molemmille korville eri signaalit mallintamalla ihmisen suuntakuulojärjestelmää. Tarkemmin lohkojen $F_{0-N}(z)$ toimintaa käsitellään luvussa 5.6.

Lohkojen $LP_{0-N}(z)$ ulostulot syötetään myös jälkikaiuntalohkoon, joka generoi viivelinjojen ja takaisinkytkettyjen alipäästö- sekä kampakokopäästösuotimien avulla diffuusia jälkikaiuntaa, joka sitten lisätään ulostulossa edellä laskettuihin suuntainformaation sisältäviin heijastuksiin. Jälkikaiuntalohkon toimintaa ja suodinkertoimien laskemista käsitellään luvussa 5.5.3.



Kuva 5.2: Toteutetun auralisointijärjestelmän lohkokaavio (Savioja et al., 1997b)

Liikuttaessa konserttisalissa saatetaan joutua pisteeseen, jonne äänilähde tai mikään kuvalähteistä ei näy. Tällöin viivelinjalta ei poimita näytteitä eikä järjestelmä tuota ääntä. Oikeassa salissa tällaiseen paikkaan kuitenkin kuuluu ääntä, diffuusien heijastusten ja diffraktion ansiosta. Nämä puutteet pitää kuvalähdemenetelmässä korvata jollakin tavalla. Tässä järjestelmässä lohkon $LP_D(z)$ läpi kulkeva signaali tuottaa koko ajan diffuusaa ääntä, riippumatta siitä onko kuvalähteitä näkyvissä. Suotimien $LP_D(z)$ parametrit on valittu siten, että ne vastaavat useammasta pinnasta heijastunutta ääntä. Näin ollen vaikka joudutaan paikkaan, johon ei näy yhtään kuvalähdettä, järjestelmä tuottaa ääntä.

5.3 Kuvalähteiden dynaaminen käsittely auralisoinnissa

Virtuaalisessa tilassa liikuttaessa on kuvalähteiden³ sijaintitietoja päivitettävä jatkuvasti. Takala *et al.* (1996) esittävät kolme tapausta, joissa kuvalähteiden tai kuuntelijan sijaintitietoihin täytyy tehdä päivityksiä:

1. *Äänilähde liikkuu.* Jos äänilähde liikkuu, joudutaan kaikki kuvalähteet etsimään uudelleen. Vastaava tilanne syntyy esimerkiksi seinän siirtyessä, jolloin tutkittava tila muuttuu.
2. *Kuuntelija liikkuu.* Tässä tapauksessa kuvalähteitä ei tarvitse etsiä uudelleen, mutta jokaiselle kuvalähteelle on tehtävä uusi näkyvyystarkastelu.
3. *Kuuntelija kääntyy.* Jos kuuntelija kääntyy paikallaan, ei kuvalähteitä tarvitse etsiä eikä näkyvyystarkasteluja tarvita. Vain kuuntelijan orientaatio eli kuvalähteiden atsimuutti- ja elevaatiokulmat vaativat päivitystä.

Kuvalähteiden näkyvyystarkasteluja ja laskentaparametrien päivitystä auralisointilohkoon ei ole laskennallisesti tehokasta suorittaa jokaiselle näytteelle. Päivitystaajuus tulee kuitenkin valita siten, että se on kuulon erottelykyvyn kannalta tarpeeksi suuri. Kun päivityksiä tehdään harvemmin, on näytteiden prosessoinnissa tarvittavien parametrien arvot interpoloitava päivitysten välillä.

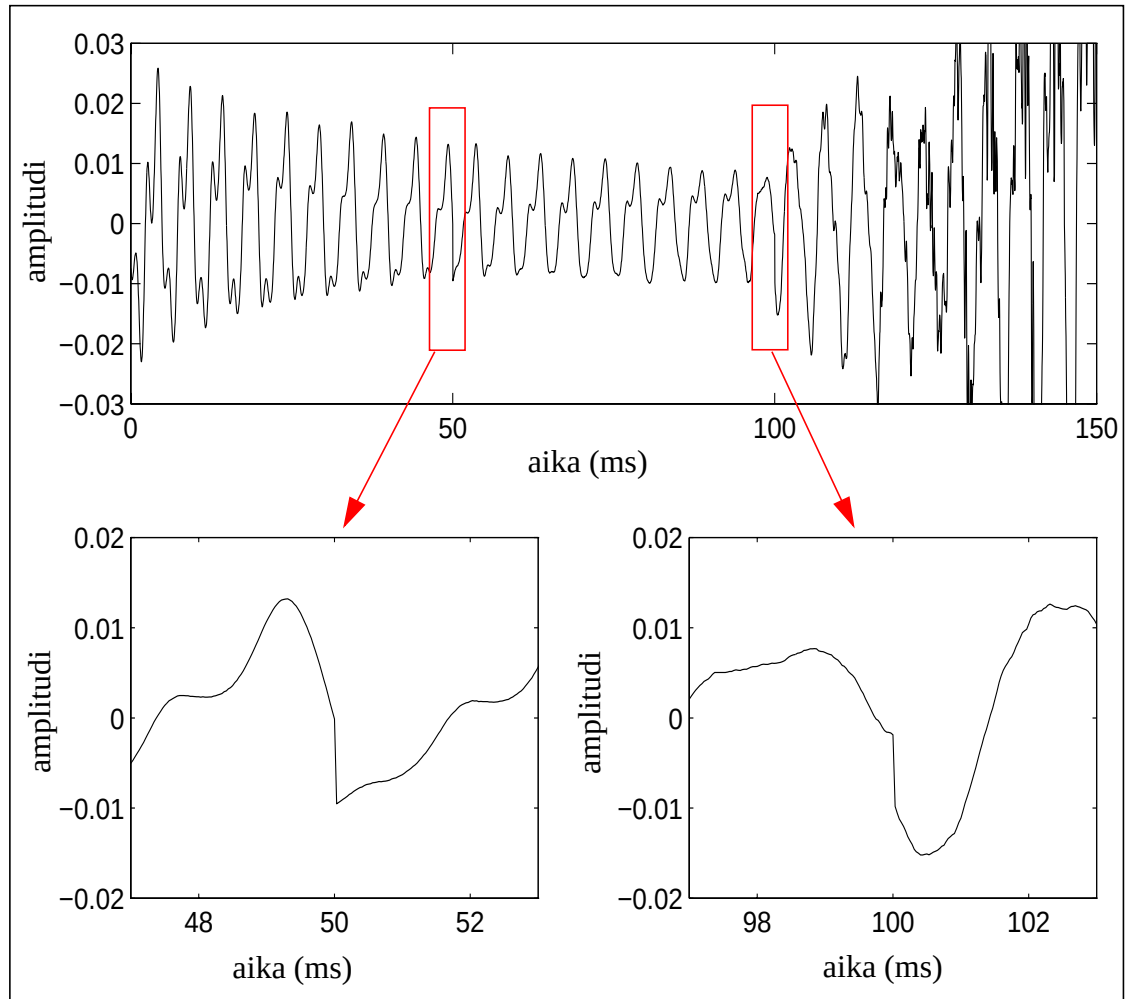
Toteutetussa reaaliaikaisessa järjestelmässä äänilähdettä ei voida liikuttaa. Sen sijaan yllä olevat tapaukset 2 ja 3 voidaan toteuttaa reaaliajassa runsaalle kymmenelle näkyvälle kuvalähteelle. Kun virtuaalisessa tilassa liikutaan, joku kuvalähteistä saattaa kadota näkyvistä tai joku toinen tulla näkyviin. Jos yhdenkin kuvalähteen päivitys tapahtuu yhden

3. Tässä luvussa esitetyt asiat pätevät sekä äänilähteelle että kaikille kuvalähteille. Tämän vuoksi puhuttaessa kuvalähteistä tarkoitetaan sillä myös itse äänilähdettä.

näytteen aikana, kuunneltavaan signaaliin tulee epäjatkuvuuskohta. Tämä kuullaan epämiellyttävänä naksahduksena. Epäjatkuvuuskohtien eliminoimiseksi täytyy kuvalähteitä häivyttää (engl. fade out), kun ne ovat poistumassa näkyvistä sekä vahvistaa (engl. fade in), kun ne tulevat näkyviin.

Edellisessä kappaleessa kuvatus ongelman ratkaisemiseksi on laskentamallin toteutuksessa pidettävä kirjaa jokaisen kuvalähteen tilasta, koska kuvalähteiden etsimisessä käytettävä ohjelmalohko välittää auralisointilohkoon vain näkyvien kuvalähteiden tiedot. Mahdollisia kuvalähteiden tiloja on neljä: näkymätön, vahvistettava, näkyvä ja häivytettävä. Kun laskenta-aikaa ja muistikapasiteettia on käytettävissä riittävästi, toteutus on hyvin yksinkertainen. Jokaisen mahdollisen kuvalähteen tila pidetään muistissa ja jokaisen näytteen aikana kaikkien kuvalähteiden tilat käydään läpi. Tällöin kaikki muut paitsi näkymättömät kuvalähteet auralisoidaan.

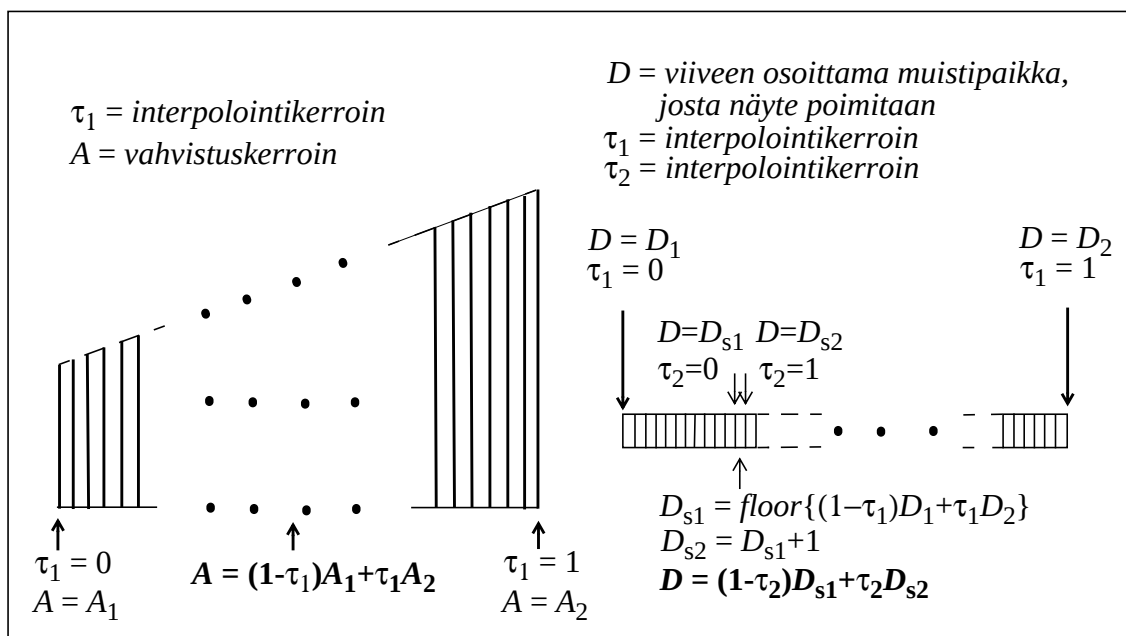
Reaaliaikaisessa järjestelmässä ei ole aikaa tarkastella jokaista mahdollista kuvalähdettä. Tällöin edellisellä päivityskerralla saatujen näkyvien kuvalähteiden indeksinumeroita voidaan verrata uusien kuvalähteiden indeksinumeroihin. Jos indeksinumeroissa on eroja kahden päivityksen välillä, voidaan päätellä, että jokin kuvalähteistä on joko muuttunut näkymättömäksi tai tullut näkyviin. Tällöin kyseisen kuvalähteen tila muutetaan vastaavasti häivytettäväksi tai vahvistettavaksi. Auralisoinnissa häivytettävien kuvalähteiden vahvistuskerroin häivytetään nolnaan ja vahvistettavien kuvalähteiden vahvistuskerroin voimistetaan lineaarisesti nollasta haluttuun voimakkuuteen.



Kuva 5.3: Yhden kuvalähteen tuottama signaali, jonka vahvistuskerrointa ja viivettä ei ole interpoloitu (herätteenä oli kaiutonta sellomusiikkia). Interpoloinnin puutteen huomaa epäjatkuvuuskohtana 50 ja 100 ms kohdilla, joissa kuvalähteen vahvistuskerrointa ja viivettä on päivitetty.

Kuuntelijan liikkeessa kuvalähde pysyy useimmiten näkyvissä, mutta kuvalähteen etäisyys kuuntelijasta muuttuu. Etäisyys vaikuttaa sekä signaalin vahvistuskertoimeen että viiveeseen. Kuvassa 5.3 on lyhyt jakso yhden kuvalähteen tuottamasta signaalista, josta puuttuvat vahvistuskertoimen ja viiveen interpoloinnit päivityshetkien välillä. Interpoloinnit tehdään lineaarisesti kahden peräkkäisen päivityksen välillä epäjatkuvuuskohtien välttämiseksi. Ensin interpoloidaan vahvistuskertoimen A arvo käyttämällä interpolointikerrointa τ_1 , jota kasvatetaan lineaarisesti kahden päivityksen välillä. Sen jälkeen interpoloidaan viive eli lasketaan osoitin viivelinjan muistipaikkaan, josta näyte poimitaan. Viiveen interpolointi tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin vahvistuskertoimen interpolointi eli laskemalla osoitin muistipaikkaan interpolointikertoimen τ_1 avulla. Tasavälisen interpoloinnin saavuttamiseksi on kuitenkin käytettävä myös toista

interpolointikerrointa τ_2 , jolla toteutetaan murtoviive kahden peräkkäisen näytteen välillä. Murtoviive lasketaan poimimalla viivelinjasta kaksi peräkkäistä näytettä, joiden välinen suhde lasketaan interpolointikertoimen τ_2 avulla. Lopullinen näytteen arvo saadaan kertomalla näyte vielä interpoloidulla vahvistuskertoimella. Murtoviiveen toteutuksessa voidaan käyttää myös muita interpolointimenetelmiä sekä interpolointia useamman näytteen välillä (Laakso *et al.*, 1996). Kuvälähteen etäisyydestä johtuvan viiveen tapauksessa ensimmäisen asteen lineaarisen interpoloinnin käyttö on kuitenkin laskennallisesti tehokasta sekä kuulon erottelukyvyn kannalta riittävää. Koska päivitetyn viiveen pituus pyöristetään aina kokonaislukuun, ei kuuntelijan ollessa paikallaan tarvitse laskea murtoviivettä. Tällöin ensimmäisen asteen lineaarisen interpoloinnin aiheuttaman ali-päästösuodatuksen vaikutus saadaan minimoitua, eikä interpolointi vaikuta häiritsevästi ulostulevan signaalin taajuusvasteeseen.

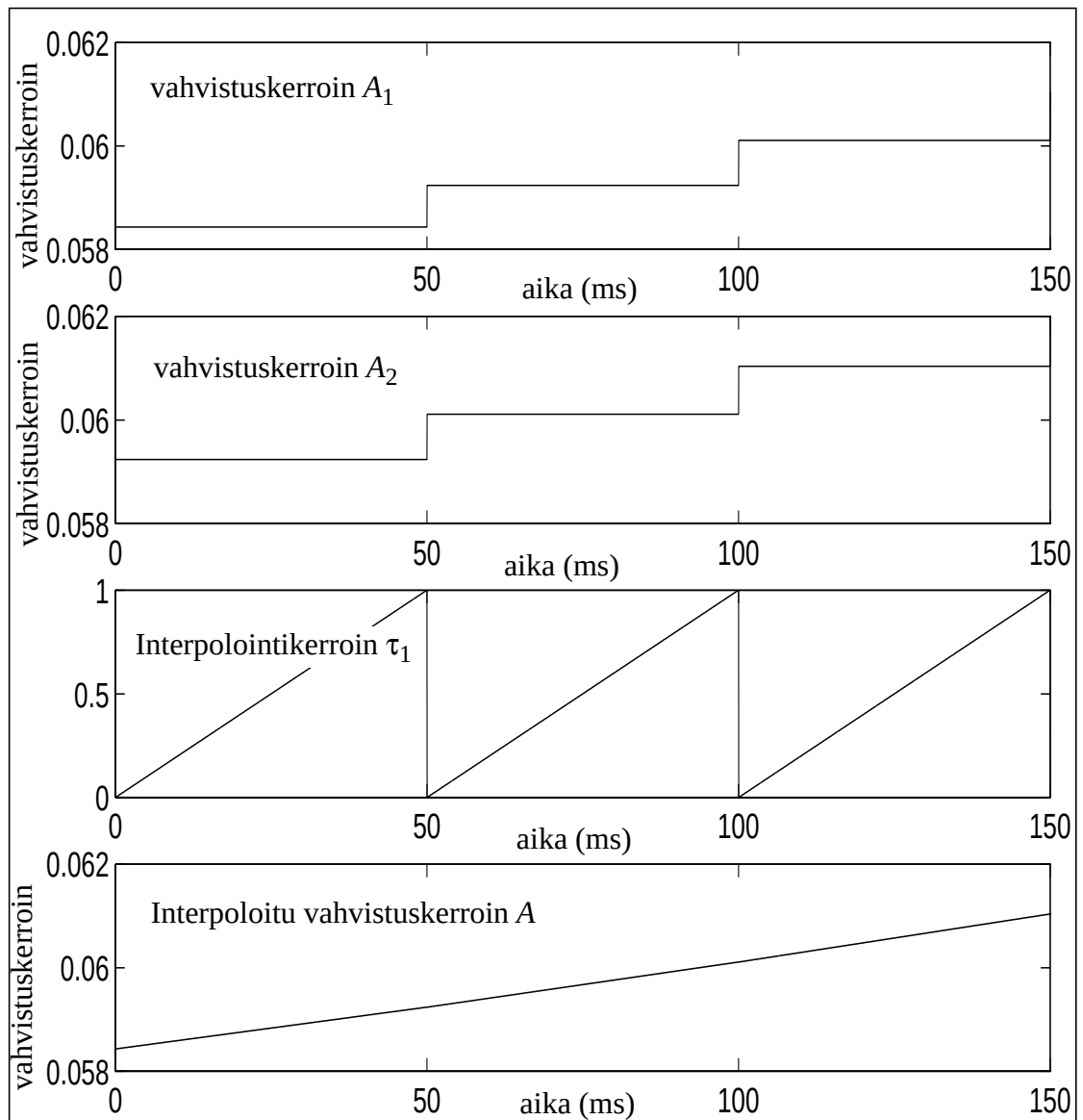


Kuva 5.4: Interpolointi kahden päivityshetken välillä. Vasemmalla on vahvistuskertoimen ja oikealla viiveen interpolointi. D_{s1} :n kaavassa oleva floor-funktio tarkoittaa pyöristystä lähimpään pienempään kokonaislukuun.

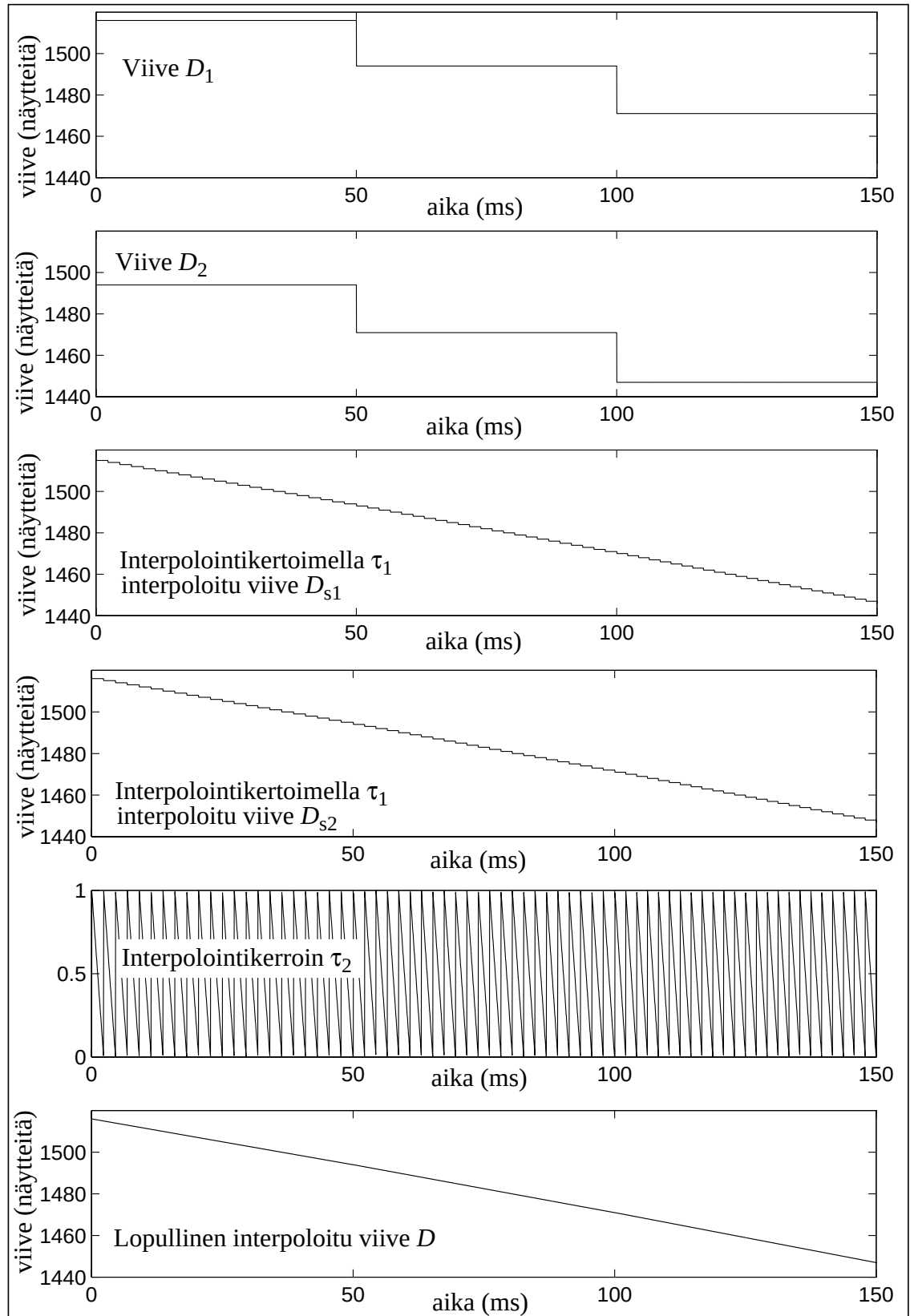
Kuvassa 5.5 on esimerkki vahvistuskertoimen A interpoloinnista yhdelle kuvälähteelle. Kuvasta nähdään, kuinka vahvistuskerroin kasvaa aina jokaisen päivityksen kohdalla liikuttaessa lähemmäksi kuvälähdettä. Kun interpolointi on toteutettu kuvan 5.4 yhtälöllä saadaan interpoloitu jatkuva vahvistuskerroin A (kuva 5.5). Saman kuvälähteen viiveen interpoloinnista on esimerkki kuvassa 5.6. Kuvälähdettä kohti liikuttaessa viive pienenee ja päivitykset tehdään jälleen hetkillä 50 ja 100 ms. Ensin on laskettu interpolointikertoimen τ_1 avulla viiveet D_{s1} ja D_{s2} , jotka ovat porraskuvioisia. Viive saadaan muuttumaan

tasaisesti interpolointikertoimen τ_2 avulla. Lopullisen murtoviiveillä interpoloidun viiveen arvo nähdään kuvan 5.6 alimmasta ruudusta. Kuvassa 5.7 on vielä kuvan 5.4 signaali interpoloituna. Kuvassa ei ole enää epäjatkuvuuskohtia päivityshetkillä, vaan signaali on jatkuva.

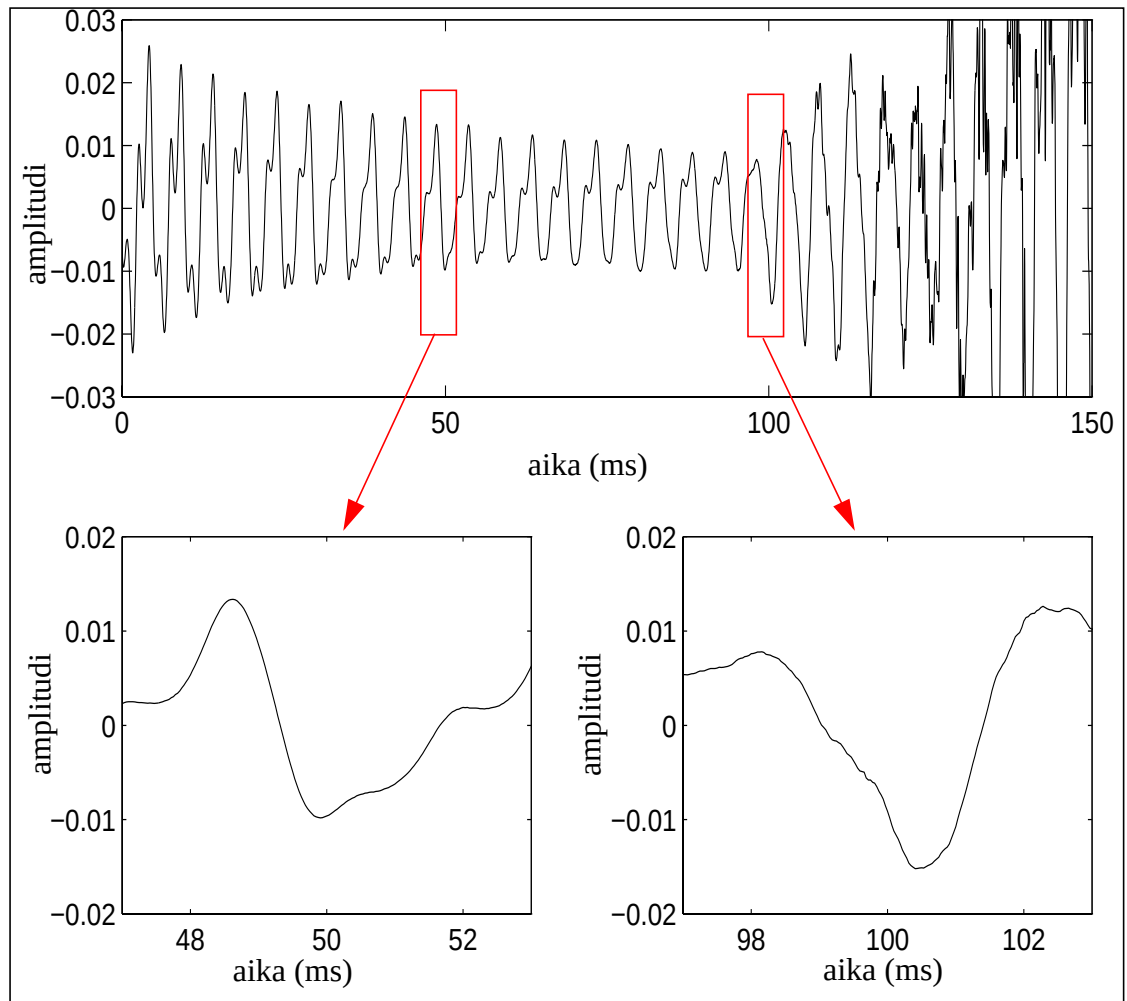
Edellä esitetyissä esimerkeissä tehty vahvistuskertoimen A ja viiveen D interpolointi on tehtävä jokaiselle näkyvälle kuvalähteelle erikseen, koska jokaisella kuvalähteellä on oma etäisyydestä riippuva vahvistuskerroin ja viive.



Kuva 5.5: Esimerkki interpoloidun vahvistuskertoimen A laskemiseksi yhdelle kuvalähteelle, jota kohti liikutaan. Interpoloinnit on laskettu kuvassa 5.4 esitetyllä kaavalla.



Kuva 5.6: Esimerkki interpoloidun viiveen D laskemiseksi yhdelle kuvalähteelle, jota koh-
ti liikutaan. Interpoloinnit on laskettu kuvassa 5.4 esitetyillä yhtälöillä.



Kuva 5.7: Yhden kuvalähteen tuottama signaali, jossa sekä vahvistuskerroin että viive on interpoloitu. Interpoloinnin ansiosta kuvan 5.3 epäjatkuvuuskohdat hetkillä 50 ja 100 ms ovat poistuneet ja signaali on jatkuva.

Kun interpoloinnissa käytetään murtoviiveitä ja mallinnettavassa tilassa liikutaan nopeasti, havaitaan Doppler-ilmiö. Rossingin (1990) mukaan tämä äänennopeuden suhteellises- ta muutoksesta johtuva fysikaalinen ilmiö kuullaan jos joko äänilähde, kuuntelija tai molemmat liikkuvat. Liikuttaessa äänilähteeseen päin äänen korkeus nousee ja vastaavas- ti liikuttaessa lähteestä poispäin äänen korkeus laskee.

5.4 Äänilähde

Äänilähteellä tarkoitetaan sitä pistettä, josta kaiutonta herätettä syötetään virtuaalisen ää- niympäristön tuottavaan järjestelmään. Luonnollinen tai synteettinen heräte voi olla pu-

hetta, musiikkia tai mitä hyvänsä ääntä. Tässä työssä on tarkoituksena luoda virtuaaliääniympäristö konserttisalin laskennalliseen malliin, joten on luonnollista käyttää herätteenä musiikkia, jolloin äänilähde on soittaja instrumentteineen.

Äänilähteen mallina toteutetussa järjestelmässä käytetään pistemäistä ympärisäteilevää alkiomonopolia. Se voidaan sijoittaa mielivaltaiseen pisteeseen mallinnetussa konserttisalissa. Pistemäisen äänilähteen käyttö on sikäli perusteltua, että kuvalähdemenetelmän johtamisessa käytettiin pistemäistä alkiomonopolia (luku 3.1). Toisaalta yksikään todellinen äänilähde ei ole pistemäinen, joten laskentamenetelmissä tulisi aina käyttää tietyn tilavuuden omaavaa lähdettä. Suurempaa lähdettä voidaan approksimoida usealla pisteellä. Useimmissa tapauksissa tämä on riittävää, mutta esimerkiksi pitkien viivalähteiden mallintaminen pistemäisillä äänilähteillä on hankalaa. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin pistemäisen äänilähteen käyttöön, koska se oli yksinkertaisin ja suoraviivaisin toteuttaa.

Toteutetussa järjestelmässä voidaan käyttää N kappaletta äänilähteitä. Reaaliaikatoteutuksessa lasketaan kuvalähteet äänilähteiden sijaintien keskiarvopisteelle, jos äänilähteet ovat lähekkäin. Luonnollisesti, jos laskentakapasiteettia on tarpeeksi käytettävissä ja äänilähteet ovat kaukana toisistaan, kuvalähteet on laskettava kullekin äänilähteelle erikseen. Haluttaessa käyttää äänilähteinä useampia soittajia, jopa koko orkesteria, tulisi myös muiden soittajien suhteen muodostaa kuvalähteitä. Toisaalta kuvalähdemenetelmässä käytettyjen yksinkertaistuksien vuoksi laskentamallin antama tulos on joka tapauksessa vain karkea approksimaatio ääniaaltojen oikeasta käyttäytymisestä, joten muista soittajista aiheutuvat heijastukset voidaan jättää huomioimatta. Eräs mahdollisuus on mallintaa koko orkesteria pieninä ryhminä, joilla olisi omanlaisensa säteilyominaisuudet.

5.4.1 Äänilähteen suuntaavuus

Meyer (1978) esittelee teoksessaan soittimien suuntaavuusominaisuuksista, jotka vaihtelevat suuresti eri soittimien välillä. Soittimien säteilykuvio on myös riippuvainen taajuudesta. Virtuaaliääniympäristön luomisessa ei riitä, että otetaan huomioon pelkästään soittimen suuntaavuusominaisuudet, vaan myös itse soittajan vaikutus säteilykuvioon tulee huomioida.

Mallinnettavassa konserttisalissa kuuntelijan ja lähteen etäisyys on yleensä useita metrejä, joten äänilähde on kuuntelijan kannalta aina kaukokentässä. Äänilähdettä voidaan kuvata tällöin kompleksisella äänipaineen jakautumalla, joka on lähteen akustisen keskipisteen ympärillä. Kaukokentässä äänilähteen suuntakuvio ei riipu etäisyydestä, jo-

ten suuntaavuusominaisuuksien huomioiminen vaatii vain lähteen orientaation eli atsimuutti- ja elevaatiokulmien tuntemisen. (Lehnert ja Blauert, 1992)

Huopaniemi *et al.* (1994) ehdottavat, että äänilähteen suuntaavuus voidaan laskentamalleissa ottaa huomioon kolmella eri tavalla:

1. käyttämällä säteilysuunnasta riippuvia suotimia
2. käyttämällä useaa äänen säteily pistettä yhdelle äänilähteelle
3. käyttämällä suuntariippuvaa herätettä

Näistä yleiskäyttöisin on ensimmäinen vaihtoehto, sillä se ei ota kantaa herätteenä käytettävään ääninäytteeseen. Karjalainen *et al.* (1995b) ovat artikkelissaan tutkineet trumpetin suuntaavuusominaisuuksia. He ovat mallintaneet suuntaavuutta ensimmäisen asteen IIR-suotimilla siten, että suoraan eteenpäin sateilevä ääni on normalisoitu tasaiseksi koko taajuuskaistalla ja muiden suuntien suotimet on suhteutettu tähän referenssisuotimeen.

Suuntaavuusominaisuuksia toteuttavia suotimia (Kuvan 5.2 lohkot $D_{0-N}(z)$) ei tässä työssä ole toteutettu, koska mittaustuloksia eri instrumenttien säteilykuvioista on heikosti saatavilla.

5.5 Siirtotie

Siirtotiellä tarkoitetaan mallinnetun tilan akustiikkaa eli sitä siirtotietä, joka alkaa äänilähteestä ja päättyy kuuntelijaan. Jos auralisointi suoritetaan paikallaan oleville lähteelle ja kuuntelijalle, voidaan siirtotien mallinnuksessa käyttää mitä tahansa laskennallista mallinnusmenetelmää. Esimerkiksi kuvalähdemenetelmällä voidaan muodostaa siirtotien impulssivaste paloittain taajuusalueessa kaavan (3.5) mukaan ja toteuttaa auralisointi luvussa 4.1 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Vuorovaikutteisessa auralisoinnissa, jossa halutaan liikkua pisteestä toiseen, ei kuitenkaan voida käyttää siirtotietä kuvaavaa, etukäteen laskettua impulssivastetta. Tällöin on käytettävä menetelmää, jossa siirtotien impulssivaste on jaettu aika-alueessa paloihin, jotka ovat lyhyempiä kuin kuuntelijan sijaintitietojen päivityksien väliset ajanjaksot. Geometriseen akustiikkaan perustuvat mallinnusmenetelmät toteuttavat tämän ehdon, sillä jokaista yksittäistä heijastusta voidaan käsitellä ja prosessoida erikseen.

Kuten luvussa 2.4 todettiin, siirtotietä mallinnettiin tässä työssä kuvalähdemenetelmän ja keinotekoisien jälkikaiunna aika-alueen yhdistelmällä. Jälkikaiunta-algoritmi on jokaisessa kuuntelupisteessä samanlainen, mutta kuvalähteitä käsitellään siirtotien akustisten ominaisuuksien mukaan alla esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Jokaisella kuvalähteellä on etäisyydestä ja seinien, joiden suhteen kyseinen kuvalähde on muodostettu, heijastuskertoimista johtuen erilaiset ominaisuudet. Laskenta on suoritettava kullekin kuvalähteelle erikseen koko taajuuskaistalla ja mahdollisimman tehokkaasti. Näin ainoa järkevä ratkaisu on käyttää digitaalisia suotimia, jotka täyttävät nämä vaatimukset.

Jokaiselle kuvalähteelle on toteutetussa järjestelmässä otettu huomioon seuraavat siirtotien ominaisuudet:

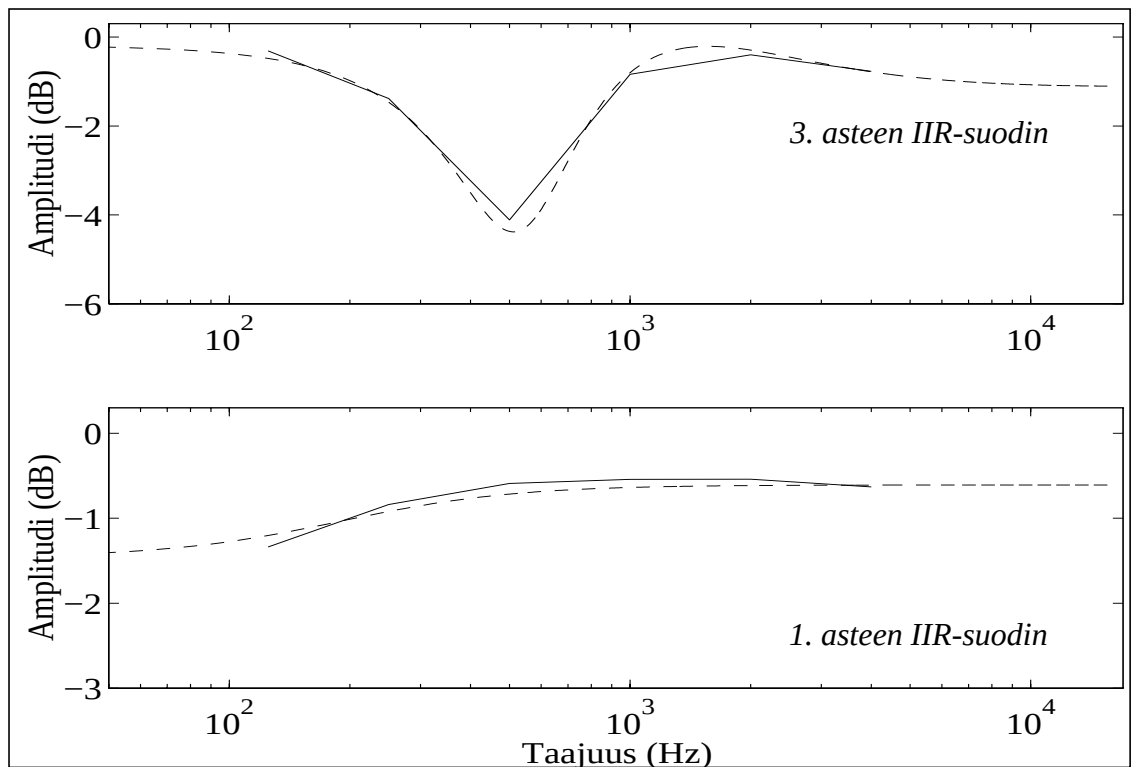
1. Kuvalähteen etäisyydestä johtuva taajuudesta riippumaton $1/r$ -lain mukainen äänen vaimeneminen.
2. Seinien heijastuskertoimien mukainen taajuusriippuva vaimeneminen.
3. Ilman absorptiosta johtuva taajuusriippuva vaimeneminen.

Etäisyydestä riippuvan vahvistuskertoimen toteutus on hyvin yksinkertainen; signaalin amplitudi jaetaan kuvalähteen etäisyydellä. Sen sijaan seinien ja ilman absorptiosta johtuvan taajuusriippuvan vaimenemisen laskeminen on hankalampaa. Toteutetut ratkaisut perustuvat Huopaniemi *et al.* (1997b) esittämiin ajatuksiin käyttää vaimennukseen yksinkertaisia digitaalisia suotimia.

5.5.1 Seinien heijastuskertoimet

Kompleksisia, myös äänen tulokulmasta riippuvia seinien materiaalien heijastuskertoimia on riittäväällä luotettavuudella ja tarkkuudella vaikea mitata. Jos suuntariippuvuus jätetään huomioimatta, voidaan Lahden (1995) mukaan mitata kompleksinen heijastuskerroin joko kaiuttomassa huoneessa korvaus- tai ikkunointimenetelmällä tai kaapeissa kovapintaissa putkessa taajuusvastemenetelmällä. Mittaukset vaativat kuitenkin suurta tarkkuutta ja laboratorio-olosuhteita. Sen sijaan energian absorptiokertoimia, joista voidaan laskea reaalisia heijastuskertoimia kaavan (3.6) avulla, on saatavilla oktaavikoitettain yleisimmille pintamateriaaleille.

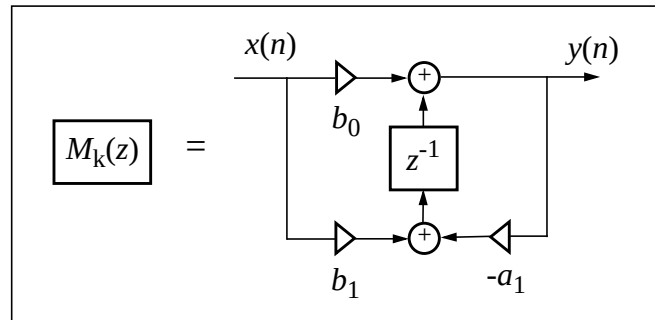
Huopaniemi *et al.* (1997b) mukaan heijastuskerroinsuotimien suunnittelussa käytetään lähtöaineistona oktaavikaistoittaisia materiaalien absorptiokertoimia. Niistä lasketaan kullakin oktaavikaistalla kaavalla (3.6) heijastuskertoimet, joiden mukaan piirretään magnitudivaste. Tämä vaste minimivaiheistetaan ja saatuun käyrään sovitetaan pienimmän neliösumman menetelmällä, Matlab⁴ -ohjelmiston tarjoamaa `invfreqz`-funktioita käyttäen, haluttu IIR-suodin. Suodin voidaan myös suunnitella siten, että useamman materiaalin absorptiokertoimet kerrotaan ensin taajuuskaistoittain keskenään ja suodin suunnitellaan vasta näistä yhdistetyistä heijastuskertoimista. Näin saadaan suotimet korkeamman kertaluvun kuvalähteille eli useammasta kuin yhdestä pinnasta heijastuneille heijastuksille. Kuvassa 5.8 on esimerkit ensimmäisen ja kolmannen asteen suotimien taajuusvasteista.



Kuva 5.8: Kahden eri heijastuskerroinsuotimen taajuusvasteet (katkoviivat), jotka on sovitettu absorptiokertoimista laskettuihin heijastuskertoimiin (yhtenäiset viivat). Yläkuvan materiaaliyhdistelminä ovat karkea betoni ja puu. Alakuvassa vastaavasti vaste kuvaa karkeasta betonista sekä 10 mm paksusta kipsilevystä heijastuneen äänen vaimenemista.

IIR-suotimille käytetään transponoitua suora muoto II -toteutusta (kuva 5.9). Proakiksen ja Manolakiksen (1992) mukaan suora muoto II -toteutus minimoi tarvittavien muisti-paikkojen sekä suoritettavien yhteen- ja kertolaskujen määrän.

4. Matlab, Signal Processing Toolbox, Mathworks Inc.



Kuva 5.9: *Transponoitu suora muoto II -toteutus ensimmäisen asteen IIR-suotimelle.*

5.5.2 Ilman absorptio

Kaasumaisessa väliaineessa etenevän äänen taajuudesta riippuva vaimeneminen johtuu Kuttruffin (1991) mukaan lähinnä kolmesta syystä:

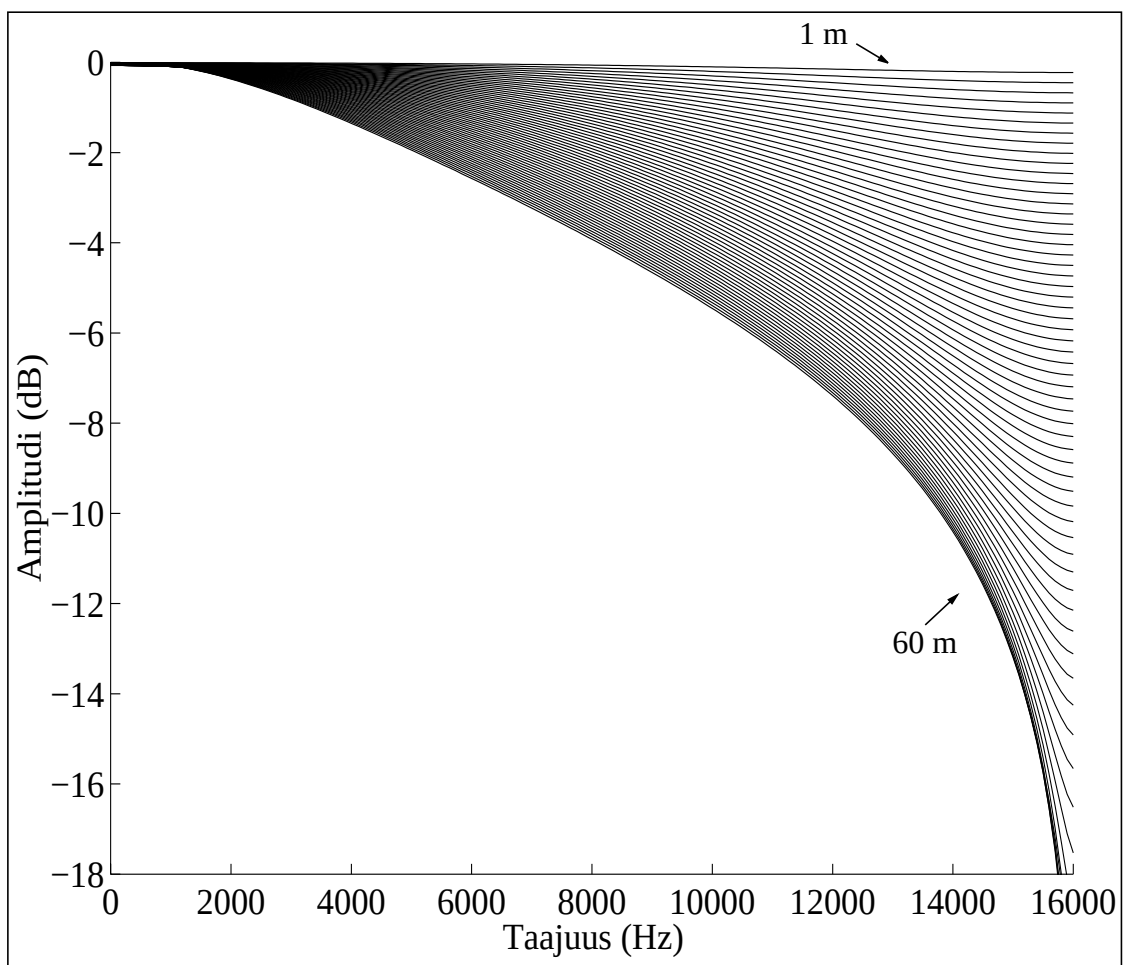
1. lämpöenergian siirtymisestä kaasuelementtien (engl. volume elements) välillä
2. viskoottisista häviöistä, jotka johtuvat pääasiassa mekaanisen energian muuttumisesta lämpöenergiaksi
3. termisestä relaksaatiosta (engl. thermal relaxation).

Normaaliolosuhteissa lämpöenergian siirtyminen ja viskoottiset häviöt ovat häviävän pieniä verrattuna termiseen relaksaatioon, joka voidaan selittää seuraavasti.

Kaasumolekyylit sisältävät termistä energiaa kolmessa eri muodossa (engl. translational, vibrational and rotational energy). Tasapainotilassa energia on jakautunut tasaisesti näiden kolmen momentin kesken. Jos kaasu puristuu nopeasti kasaan eli kun sen energia kasvaa, tallentuu kaikki ylimääräinen energia ensiksi translational-momenttiin. Myöhemmin tilanne tasaantuu ja energia jakaantuu tasaisesti kaikkien kolmen momentin kesken. Toisin sanoen tasapainotilan löytäminen vie määrätyn ajan. Ääniaallot aiheuttavat kaasussa periodisesti toistuvia tihentymiä ja harventumia. Koska tasapainotilan saavuttaminen vie aikaa, vain pienillä taajuuksilla terminen tasapaino säilyy aaltoliikkeen aikana. Suuremmilla taajuuksilla molekyylit eivät ehdi saavuttaa tasapainotilaa ennen seuraavaa aaltoa, jolloin osa energiasta muuttuu lämmöksi. Mitä suurempi taajuus on, sitä enemmän tämä vaimentaa aaltoliikettä. (Kuttruff, 1991)

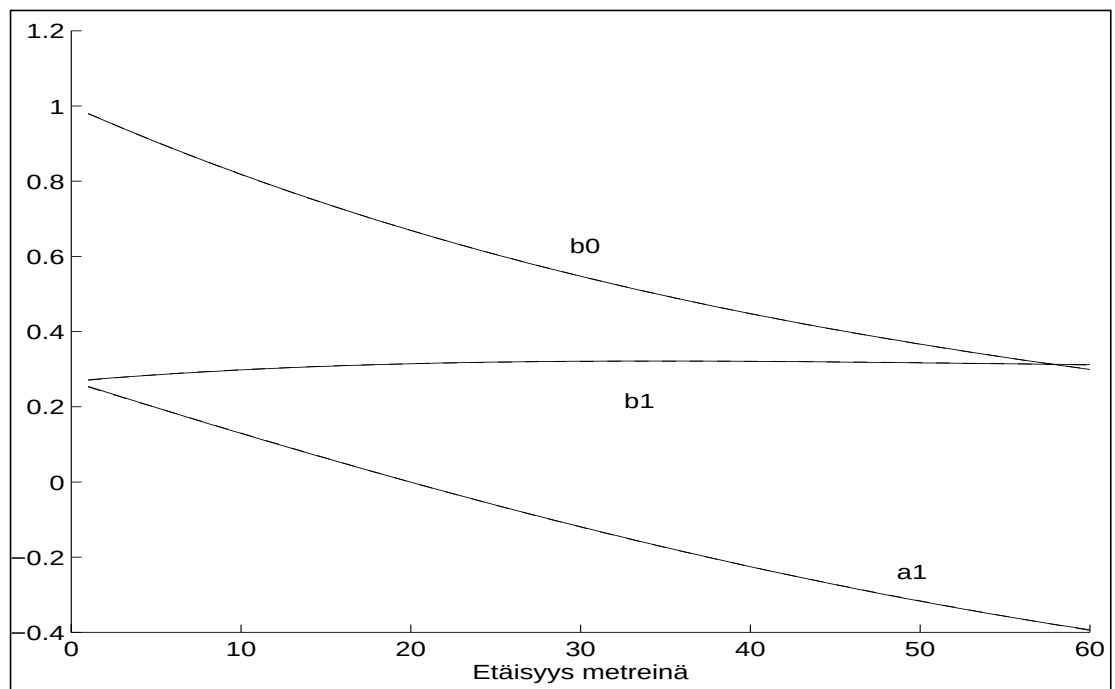
Äänienergian absorpoitumiseen ilmassa vaikuttavat pääasiassa kolme suuretta; lämpötila, ilman kosteus ja äänen kulkema matka. Näistä lämpötilaa ja ilman kosteutta voidaan koh- tuullisella tarkkuudella pitää vakiona normaalissa konserttisalissa, joten ainoaksi muuttu- vaksi suureeksi jää ääniaallon kulkema matka.

Bass *et al.* (1972) ovat tutkineet analyttisesti ilman absorption vaikutusta ääniaaltoihin lämpötilan, ilman kosteuden ja etäisyyden funktiona. Sittemmin ilman absorptio on myös standardoitu (ISO, 1993). Ilman absorption taajuusvastefunktiot ovat luonteeltaan ali- päästötyyppisiä, joten niihin voidaan tehokkaasti sovittaa ensimmäisen asteen IIR-suoti- mia. Tässä työssä laskettiin ilman absorptio Bass *et al.* (1972) esittämien lausekkeiden mukaan, kuten Huopaniemi *et al.* (1997b) ovat esittäneet. IIR-suotimien sovitusta tehtiin, kuten heijastuskerroinsuotimien tapauksessa, käyttämällä pienimmän neliösumman me- netelmää. Suotimet toteutettiin kuvan 5.9 mukaisilla transponoiduilla suora muoto II - suotimilla. Kuvassa 5.10 on esimerkkejä suotimien taajuusvasteista.



Kuva 5.10: Ilman absorptiosuotimet etäisyyden ja taajuuden funktiona. ilman kosteus on 60 %. Kuvassa on 60 suodinta metrin välein, yhden metrin etäisyydeltä lähtien.

Toteutetussa reaaliaikaisessa järjestelmässä päivitetään ilman absorptiosuotimia metrin välein. Tällöin suodinkertoimet voidaan hakea etukäteen lasketusta taulukosta. Jos laskenta-aikaa on käytettävissä enemmän, voidaan suodinkertoimet interpoloida vastaamaan kuvalähteen tarkkaa etäisyyttä. Interpolointia varten metrin välein lasketuista suodinkertoimista piirrettiin käyrät, joihin sitten sovitettiin toisen asteen funktiot Matlabin `polyfit`-funktioilla. Näistä yhtälöistä voidaan laskea suodinkertoimet kuvalähteen tarkan etäisyyden mukaan. Kuvassa 5.11 on suodinkertoimien arvojen laskemista varten tehtyjen yhtälöiden kuvaajat laskettuna kuvan 5.10 suotimista.



Kuva 5.11: Suodinkertoimien a_1 , b_0 ja b_1 interpolointia varten laskettujen toisen asteen funktioiden kuvaajat. Kuvaajat on laskettu kuvan 5.10 suotimista.

5.5.3 Jälkikaiunta

Realistisen ääniympäristön tuottamiseksi on kuvalähdemenetelmällä toteutettuun aurali-soitavaan malliin lisättävä jälkikaiunta-algoritmi, joka mallintaa varhaisten heijastusten jälkeen syntyvää diffuusia äänikenttää. Jälkikaiunta toteutetaan yleensä rekursiivisilla digitaalisuotimilla, jotka ovat laskennallisesti tehokkaita. Ensimmäisen digitaalisuodintoteutuksen esitti Schroeder (1962). Siinä käytettiin neljää rinnakkaista kampasuodinta, jotka oli kytketty sarjaan kahden kokopäästösuotimen kanssa. Myöhemmin on esitetty useampiakin kaikulaitetoteutuksia, joista suurin osa on perustunut Schroederin (1962) esittä-

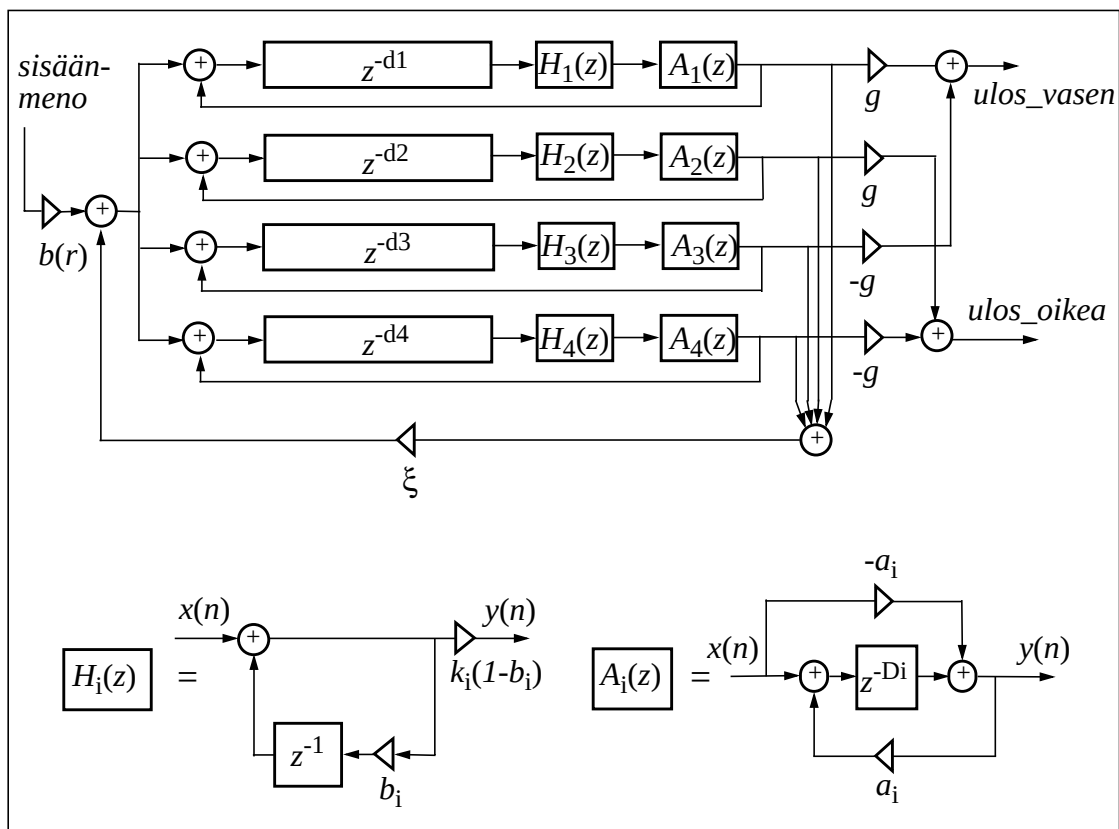
miin periaatteisiin. Vuonna 1991 Jot ja Chaigne (1991) ovat esitelleet diffuusin jälkikaiun tuottavia takaisinkytkettyjä viivematriiseja (engl. FDN, feedback delay networks). Sittemmin Jot (1992a) on julkaissut väitöskirjan huoneakustiikan mallintamisesta takaisinkytkettyjen viivematriisien avulla. Tähän työhön valittu algoritmi on Jotin (1992a) kaikulaitteen muunnos, jonka Väänänen (1997a) ja Väänänen *et al.* (1997b) ovat kehittäneet. Sillä saavutetaan pienemmällä viivelinjojen määrällä suurempi heijastustiheys kuin takaisinkytketyillä viivematriiseilla. Viivelinjojen vähentäminen pienentää luonnollisesti laskentakuormaa ja tarvittavan muistin määrää.

Kuvassa 5.12 on toteutetun diffuusia jälkikaiuntaa tuottavan algoritmin lohkokaavio. Bar-ronin mukaan (1992) oikeassa konserttisalissa jälkikaiun amplitudi on lähes vakio, riippumatta kuuntelijan paikasta. Toteutetussa järjestelmässä jälkikaiun tuottavaan lohkoon syötetään kuvalähteiden perusteella lasketut suora ääni ja varhaiset heijastukset (kuva 5.2). Niiden amplitudit ovat kääntäen verrannollisia etäisyyksiin, jolloin jälkikaiuntalohkoon syötettävän signaalin amplitudi on sitä pienempi mitä kauempana äänilähteestä ollaan. Jotta järjestelmän ulostulon amplitudi olisi kuitenkin koko virtuaalisessa konserttisalissa lähes vakio, on jälkikaiuntalohkon sisäänmenossa vahvistettava signaalia kertoimella $b(r)$, jonka arvo määräytyy suoran äänen etäisyydestä seuraavasti

$$b(r) = Gain_{dc} + r_{suora\ ääni} \cdot Gain_{ac} \quad (5.1)$$

missä $Gain_{dc}$ ja $Gain_{ac}$ ovat vakioita.

Jotin ja Chaignen (1991) mukaan viivelinjojen z^{-di} pituudet tulisi valita siten, että ne ovat lähellä toisiaan äänen väritymisen estämiseksi. Schroeder (1962) ehdottaa, että pisimmän ja lyhyimmän viivelinjan suhde ei saisi olla enempää kuin 3:2. Lyhyimmän viivelinjan pituus tulisi sovittaa siten, että se vastaa kaukaisimpien kuvalähteiden etäisyydestä saatavia viiveitä. Schroederin (1962) mukaan viivelinjojen pituuksien tulisi olla käytetyllä näytteenottotaajuudella alkulukuja, jotta heijastukset eivät summautuisi päällekkäin ja aiheuttaisi voimakkaita piikkejä aikatazon vasteessa. Tällaiset piikit kuullaan epämiellyttävinä erillisinä heijastuksina tai tärykaikuna.



Kuva 5.12: Toteutettu diffuusia jälkikaiuntaa tuottavan algoritmin lohkokaavio. Viivelinjoja voi olla myös useampia, mutta jo neljällä saadaan realistisen kuuloinen jälkikaiunta (Väänänen et al., 1997b).

Jokaisen viivelinjan päässä on alipäästösuodin (kuvan 5.12 suotimet $H_{1-4}(z)$), jonka tarkoitus on jäljitellä seinien ja ilman absorptiosta aiheutuvaa äänen taajuusriippuvaa vaimenemista. Alipäästösuotimien kertoimet b_i ja k_i määritellään Jotin (1992a) esittämien periaatteiden mukaisesti siten, että

$$k_i = 10^{-\frac{3d_i}{f_s T_r(0)}} \quad (5.2)$$

missä d_i on viivelinjojen z^{-d_i} ja z^{-D_i} yhteenlaskettu pituus, f_s on näytteenottotaajuus ja $T_r(0)$ on jälkikaiunta-aika nollataajuudella sekä

$$b_i = 1 - \frac{2}{1 + k_i^{(1-1/\epsilon)}} \quad (5.3)$$

missä $\epsilon = (T_r(\pi))/(T_r(0))$ eli jälkikaiunta-aikojen suhde Nyqvist- ja nollataajuuksilla.

Alipäästösuotimen jälkeen jokaisella viivelinjalla on kokopäästösuodin (kuvan 5.12 suotimet $A_{1-4}(z)$), jonka tarkoituksena on kasvattaa heijastustiheyttä. Kokopäästösuotimissa

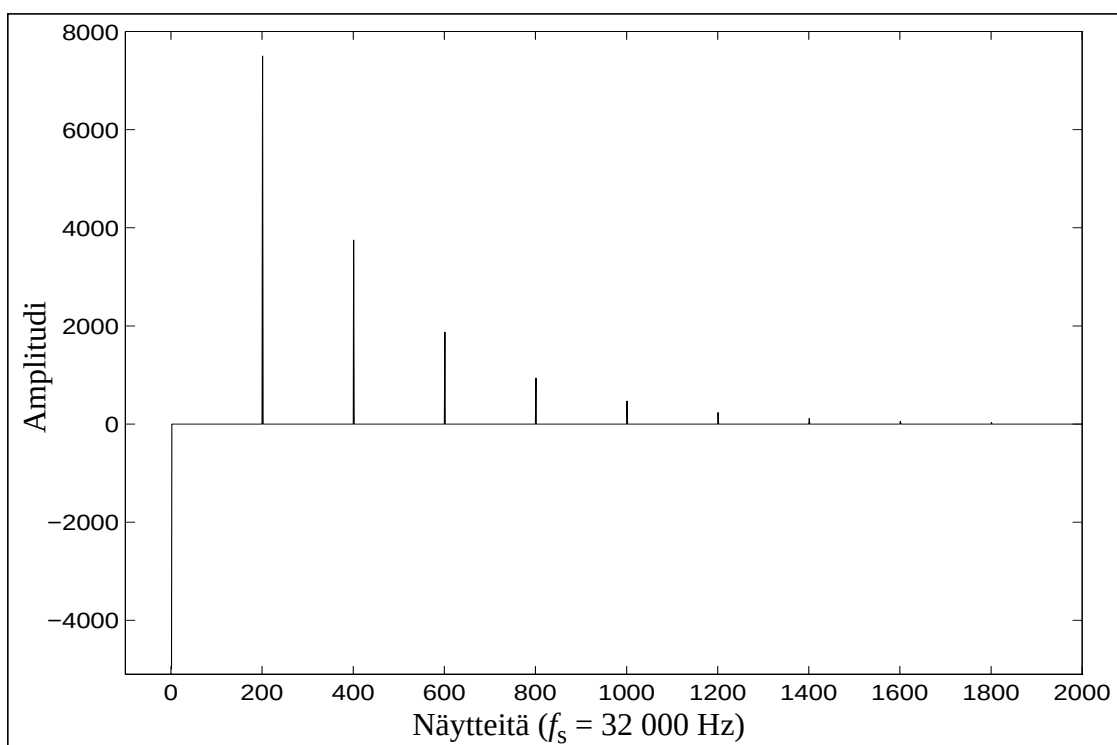
on eripituiset viiveet z^{-D_i} , jotta niiden synnyttämät heijastukset eivät kerääntyisi päällekkäin. Kuvassa 5.13 on aika-alueen vaste kokopäästösuotimelle, jonka viive z^{-D_i} on 199 näytettä ja kerroin a_i on 0,5.

Koko lohkon takaisinkytkentäkertoimen ξ arvoksi voidaan valita mikä hyvänsä ykköistä pienempi luku. Jos se lasketaan kaavalla

$$\xi = \frac{-2}{N_{DL}} \quad (5.4)$$

missä N_{DL} on viivelinjojen lukumäärä, vastaa koko toteutettu jälkikaiuntalohko takaisinkytketyn viivematriisin erikoistapausta (Jot, 1992a).

Kuten kuvasta 5.12 nähdään, poimitaan jälkikaiuntalohkon ulostuloihin näytteitä vuorotellen eri viivelinjoista. Näin saadaan eri korville mahdollisimman epäkoherentit signaalit, jolloin kaiunta-algoritmin tuottamassa äänessä on parempi tilantuntu. Ennen ulostuloja kuvassa 5.12 on jokaisen viivelinjan päässä vielä kerroin g , jolla voidaan säätää ulostulon vahvistusta. Valitsemalla joka toinen g negatiiviseksi saadaan mahdollisimman tasainen taajuusvaste (Rocchesso ja Smith, 1997).



Kuva 5.13: Kokopäästösuotimen (kuvan 5.12 suodin $A_1(z)$) aika-alueen vaste. Suotimen viive $z^{-D_1} = 199$ näytettä, kerroin $a_1 = 0,5$ ja sisäänmenneen impulssin amplitudi oli 10000.

5.6 Kuuntelija

Kuuntelijan mallintaminen on monimutkaista ja vaatii paljon laskentakapasiteettia. Kuuntelijan mallintamista tarvitaan, kun virtuaaliääniympäristöä halutaan kuunnella binauraalisesti kuulokkeilla tai kaiutinparilla (kuvat 4.1a ja 4.1b). Monikanavaisissa kuuntelujärjestelmissä kaiuttimet ympäröivät kuuntelijaa, jolloin äänen tulosuunta voidaan panoroida oikeassa suunnassa olevaan kaiuttimeen ja suuntakuulojärjestelmää ei tarvitse mallintaa. Monikanavaiset kuuntelujärjestelmät vaativat kuitenkin aina kohtuullisen suuren, akustoidun tilan sekä paljon D/A-muuntimia ja kaiuttimia. Siitä syystä lähes kaikki virtuaaliääniympäristöjärjestelmät on toteutettu binauraalisesti (Wenzel, 1996). Binauraalisten järjestelmien toteuttaminen vaatii ihmisen suuntakuulon toiminnan ymmärtämistä, jotta laskentamallit kuulostaisivat luonnollisilta.

Muun muassa Blauertin (1983) mukaan ihmisen kyky havainnoida äänen tulosuunta johtuu pääasiassa kahdesta syystä; saapuvan äänen aika- ja voimakkuuseroista korvien välillä (ITD ja ILD). Pienillä taajuuksilla korvien välinen aikaero on merkittävämpi, kun taas suurilla taajuuksilla korvien välinen voimakkuusero ohjaa äänen tulosuunnan aistimusta. ITD:n ja ILD:n tuottamat vihjeet eivät kuitenkaan kuvaa yksiselitteisesti, tuleeko ääni esimerkiksi suoraan edestä vai suoraan takaa. Tarkan suunnan aistimiseksi tarvitaan vielä vihjeitä pään, korvanlehtien ja hartioiden aiheuttamista äänen väritymisistä taajuusalueessa. Nämä väritymät voidaan todeta HRTF-mittauksilla, jotka suoritetaan ihmisen tärykalvoilta tai korvakäytävien suilta (Möller *et al.*, 1995). Määritelmän mukaan HRTF on vapaan kentän äänipaine annetussa mittauspisteessä koehenkilön korvakäytävässä, jaettuna äänipaineella samassa pisteessä koehenkilön poissaollessa (Blauert, 1983).

HRTF:t ovat lineaarisia ja aikariippumattomia, äänen tulosuunnasta riippuvia funktioita. Kukin tällainen siirtofunktio voidaan sellaisenaan esittää yhdellä FIR-suotimella. Suotimen suunnittelu ei kuitenkin ole helppoa, sillä HRTF on monimutkainen sekä aika- että taajuusalueessa. Herääkin kysymys, mikä HRTF:ssa on oleellista ja tärkeää sekä voidaan-ko funktiota yksinkertaistaa laskennan tehostamiseksi (Huopaniemi ja Karjalainen, 1997c).

Koska HRTF:t sisältävät kaiken informaation äänen tulosuunnasta — myös ITD:n ja ILD:n — voidaan Jot *et al.* (1995) mukaan HRTF:t jakaa suodinsuunnittelua varten kolmeen osaan:

1. Korvien väliseen aikaeroon
2. Korvien väliseen voimakkuuseroon

3. Vihjeisiin taajuusalueessa, jotka johtuvat ylävartalon, pään ja korvalehtien aiheuttamista heijastuksista.

Kistler ja Wightman (1992) ovat esittäneet, että korvien välinen aikaero toteutetaan yksinkertaisesti viivelinjan avulla, viivästämällä kauempana lähteestä olevaan korvaan tulevaa signaalia ja korvien välinen voimakkuusero sekä vihjeet taajuusalueessa toteutetaan minimivaiheilla FIR- tai IIR-suotimilla. Huopaniemen ja Karjalaisen (1997c) mukaan suuntainformaatiota ei hävitetä, jos minimivaiheinen FIR-suodin on vähintään astelukua 40 tai IIR-suodin on astelukua 25.

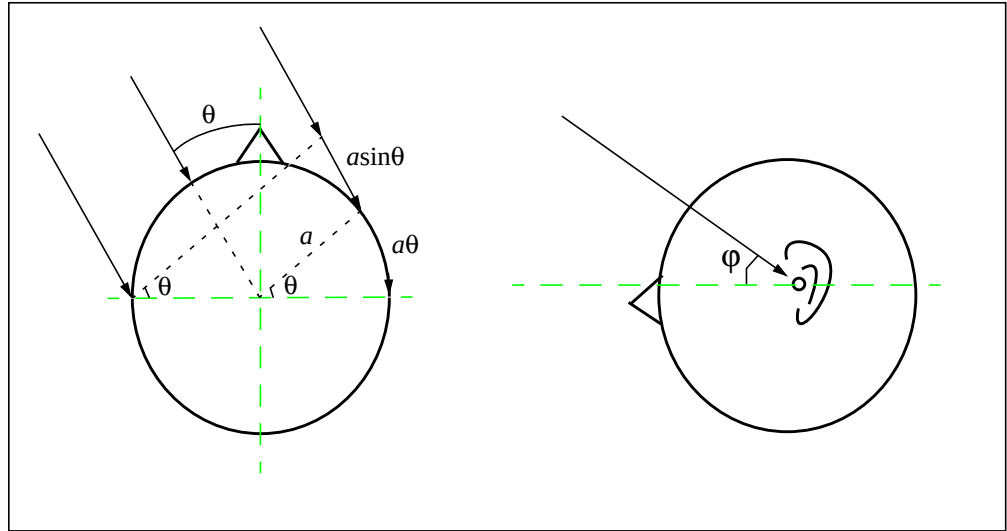
Tässä työssä HRTF:t toteutettiin juuri Kistlerin ja Wightmanin (1992) esittämällä tavalla, käyttämällä minimivaiheisia FIR-suotimia (Kuvan 5.2 lohkon $F_{0-N}(z)$ toteutus). Luvussa 5.6.1 käsitellään tarkemmin ITD:n ja luvussa 5.6.2 käytettyjen FIR-suotimien toteutusta.

5.6.1 Korvien välisen aikaeron (ITD) toteuttaminen

Huopaniemi (1997a) on esitellyt eri laskentamalleja korvien välisen aikaeron (ITD) toteuttamiseksi. Hän on myös vertaillut mitattuja viiveitä eri laskentamallien avulla laskettuihin tuloksiin. Näiden vertailujen perusteella valittiin tässä työssä käytettäväksi alunperin Woodworthin (1962) esittämä taajuusriippumaton laskentamalli, johon on huomioitu Saviojan (1997a) ehdotuksen pohjalta myös elevaatiokulma. Korvien välinen aikaero saadaan kaavasta

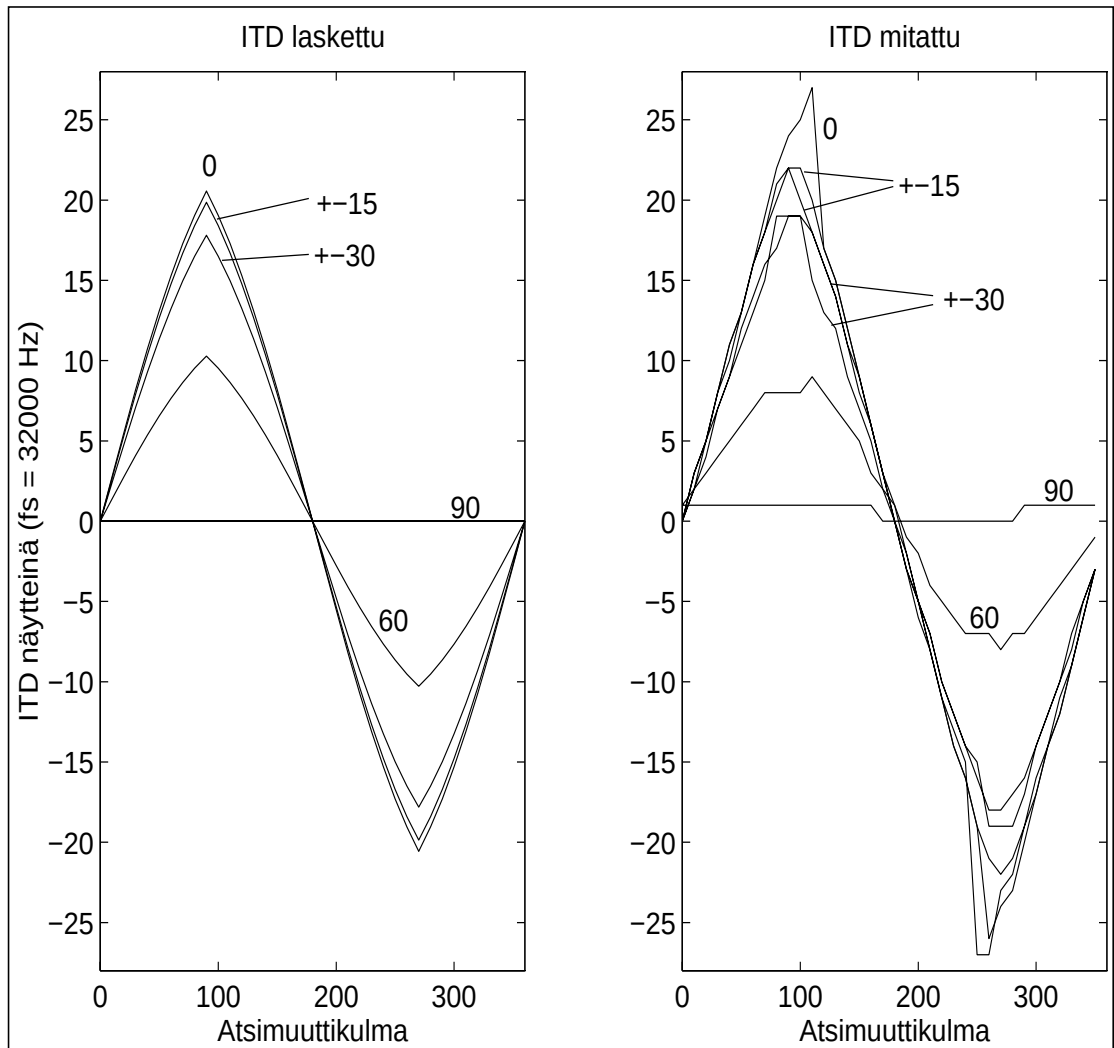
$$ITD = \frac{a(\sin\theta + \theta)}{2c} \cdot \cos\varphi \quad (5.5)$$

missä kulmien θ ja φ määritelmät selviää kuvasta 5.14, a (= 8,5 cm) on pään säde ja c (= 340 m/s) on äänen nopeus. Kuvassa 5.15 on vertailtu laskettujen ja mitattujen (Riederer, 1997) ITD:n arvoja eri elevaatio- ja atsimuuttikulmilla. Kuvasta nähdään, että laskettu ITD eroaa mitatuista arvoista hieman vain noin 100 ja 250 asteen atsimuuttikulmien kohdilla. Tämä johtuu siitä, ettei pää ole aivan pyöreä eikä symmetrinen, kuten laskentamallissa oletetaan.



Kuva 5.14: Korvien välisen aikaeron toteutuksessa käytetyn laskentamallin (kaava (5.5)) parametrien määritelmät.

Korvien välinen aikaero toteutettiin Kistlerin ja Wightmanin (1992) ehdotuksen mukaan yhdellä viivelinjalla, jossa on kaksi osoitinta näytteiden poimimista varten (kuva 5.2 lohkon ITD_{0-N} toteutus). Viivelinjaa käytetään siten, että kuvalähdettä lähempänä olevaan korvaan poimitaan näyte viivelinjan alusta ja kauempana olevaan korvaan kaavasta (5.5) lasketun ajan verran viivästettynä viivelinjalta. Jotta kuuntelijan sijainnin ja orientaation päivityksien välillä olevat epäjatkuvuuskohdat saadaan eliminoiduksi, ITD:tä interpoloidaan murtoviiveitä hyväksi käyttäen, kuten kuvalähteen etäisyydestä johtuvaa viivettä (luku 5.3 ja kuva 5.4).



Kuva 5.15: Korvien välinen aikaero eri atsimuutti- ja elevaatiokulmilla.

5.6.2 HRTF-suotimien suunnittelu ja toteutus

Huopaniemi (1997a) on tutkinut ja vertaillut eri laskenta- ja suodinsuunnittelumenetelmiä HRTF:n toteuttamiseksi. Hänen työnsä pohjalta valittiin tässä työssä käytettäväksi minimivaiheinen FIR-suodintoteutus. Tällaisessa ratkaisussa korvien välinen aikaero (ITD) erotetaan HRTF:sta (kuva 5.2 lohkon $F_{0-N}(z)$ toteutus). Myös muita suodintratkaisuja (IIR tai WIIR, warped infinite impulse response) on mahdollista käyttää, mutta niiden interpolointi on laskennallisesti monimutkaista. Jot *et al.* (1995) ovat esitelleet myös IIR- ja WIIR-suotimien interpolointimenetelmiä. Huopaniemi ja Karjalainen (1997c) ovat kuuntelukokeiden perusteella todenneet, että yleisistä (ei yksilöllisistä) HRTF:sta suunnitellut,

astelukua 30 olevat minivaiheiset FIR-suotimet eivät vielä merkittävästi heikennä suunta-
aistimuksen tarkkuutta.

Suodinsuunnittelussa käytetyt mitatut HRTF:t ovat monimutkaisia niin amplitudiltaan
kuin vaiheeltaankin. Tämän vuoksi suodinsuunnittelussa on käytettävä menetelmää, joka
säilyttää myös siirtofunktion vaiheominaisuudet. Kun HRTF:sta irroitetaan ITD, on jäl-
jelle jäänyt funktio lähes minimivaiheinen. Tästä funktiosta suunniteltu suodin sisältää
vaiheinformaation. Minimivaiheisella taajuusvasteella tarkoitetaan sellaista systeemin
vaihefunktiota, jossa vaihe saa pienimmän mahdollisen arvonsa jokaisessa taajuuden pis-
teessä. Minimivaiheinen suodin on impulssivasteeltaan lyhin mahdollinen tietyn amplitu-
divasteen toteuttava suodin. Minimivaiheisen impulssivasteen ensimmäinen arvo on
myös amplitudiltaan suurin. Napa-nollakuviossa minimivaiheisuus ilmenee yksikköym-
pyrän ulkopuolella sijaitsevien siirtofunktion nollien peilautumisena yksikköympyrän si-
säpuolelle (Huopaniemi, 1995).

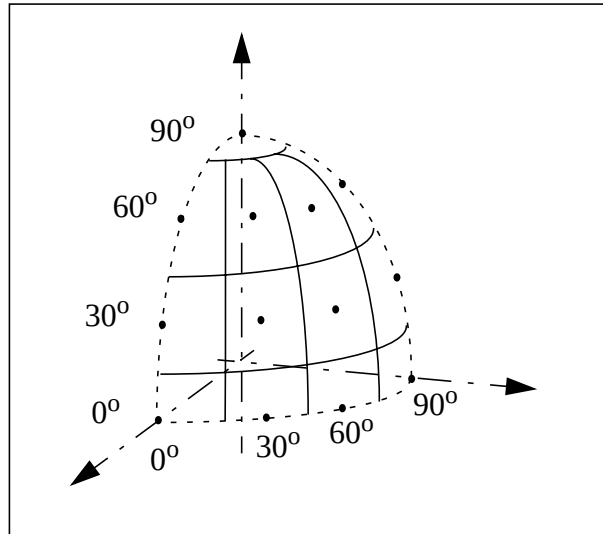
Koska mittaustuloksia, joiden mukaan minimivaiheiset FIR-suotimet suunnitellaan, ei ole
saatavilla jokaiselle atsimuutti- ja elevaatiokulmalle, on suodinkertoimia interpoloitava
tarkan suunta-aistimuksen tuottamiseksi. Interpolointi toteutettiin Huopaniemen (1997a)
esittämän yhtälön mukaan neljän vierekkäisen suotimen kesken. Interpoloinnissa jokai-
nen suodinkerroin $h_{1,i}(n, \theta, \varphi)$ (alaindeksi 1 tarkoittaa vasenta korvaa ja $n=1,2,...N$ suodin-
kertoimien lukumäärä) laskettiin kaavalla

$$\begin{aligned} h_{1,i}(n, \theta, \varphi) = & h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\}) \\ & + c_\theta [h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{ceil}\{\varphi\}) - h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\})] \\ & + c_\varphi [h_1(n, \text{ceil}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\}) - h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\})] \\ & + c_\theta c_\varphi [h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\}) + h_1(n, \text{ceil}\{\theta\}, \text{ceil}\{\varphi\}) \\ & - h_1(n, \text{floor}\{\theta\}, \text{ceil}\{\varphi\}) - h_1(n, \text{ceil}\{\theta\}, \text{floor}\{\varphi\})] \end{aligned} \quad (5.6)$$

missä $c_\theta = \theta / (\text{ceil}\{\theta\} - \text{floor}\{\theta\})$ on atsimuutti- ja $c_\varphi = (\varphi / (\text{ceil}\{\varphi\} - \text{floor}\{\varphi\}))$
on elevaatiointerpolointikerroin ja operaatiot *floor* ja *ceil* antavat lähimmät mitatut pisteet
halutuille kulmille siten, että *floor* on lähin pienempi ja *ceil* on lähin suurempi mittauspis-
te.

HRTF-suotimien suunnittelussa käytettiin hyväksi Riedererin (1997) tekemiä mittauksia.
Mittauspisteitä, joiden mukaan minimivaiheisia astelukua 30 olevia FIR-suotimia suun-
niteltiin, oli atsimuuttitasossa 10° :n välein ja elevaatiokulmille -30° , -15° , 0° , 15° , 30° ,
 60° , 90° . Koska FIR-suodatus (tehtävä jokaiselle näytteelle) ja suodinkerrointen interpo-
lointi vaatii paljon laskentakapasitettia, ei reaaliaikaisessa toteutuksessa kaikkia kuvaläh-
teitä pystytäkään käsittelemään. Jot *et al.* (1995) ehdottavat, että vain suora ääni käsitellään
tarkasti ja kaikille kuvalähteille toteutetaan vain korvien välinen aikaero sekä yhteinen

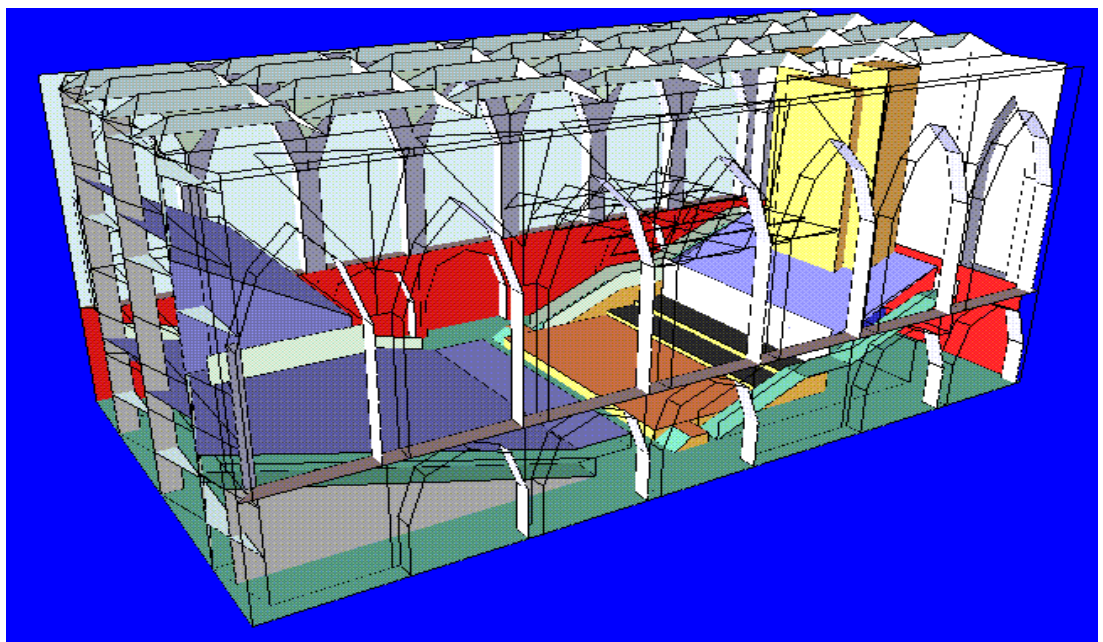
diffuusikenttänormalisoitu HRTF-suodatus. Tällöin kuitenkin kuvalähteiden suuntainformaatio heikkenee huomattavasti. Toinen tapa pienentää laskennallista kuormaa on niputtaa kuvalähteitä ryhmiiksi, kuten Heinz (1993) on artikkelissaan ehdottanut. Ryhmitteleminen on sikäli perusteltua, ettei ihmisen havainnointikyky sivusta tuleville heijastuksille ole kovin tarkka, varsinkin jos suoran äänen suunta on hyvin toteutettu. Heinz (1993) ryhmitteli heijastuksia 30° :n välein sekä horisontaali- että vertikaalitasossa (kuva 5.16).



Kuva 5.16: Kuvalähteiden ryhmitteleminen ryhmiin (Heinz, 1993).

Tässä työssä päädyttiin toteutukseen, jossa suora ääni käsitellään mahdollisimman tarkasti (ITD ja 30-asteinen interpoloitu FIR-suodatus). Kaikille kuvalähteille toteutetaan ITD, mutta FIR-suodatusta kevennetään kahdella tavalla; ensinnäkin kuvalähteet ryhmitellään ryhmiin siten, että atsimuuttikulmille välillä 5° - 14° käytetään 10° kulmaa ja atsimuuttikulmille välillä 15° - 24° käytetään 20° kulmaa jne. Elevaatiokulmille taasen välillä -22° - (-8°) käytetään kulmaa -15° ja välillä -7° - $(+7^{\circ})$ käytetään kulmaa 0° jne. Toiseksi FIR-suotimesta voidaan käyttää esimerkiksi vain kymmentä ensimmäistä kerrointa. Tämä yksinkertaistus voidaan perustella sillä, että minimivaiheisessa FIR-suotimessa suurin osa suotimen vasteen energiasta sijaitsee ensimmäisissä kertoimissa (Huopaniemi, 1997d).

Esimerkkitapauksena tässä työssä käytettiin rakenteilla olevaa Marienkirche-konserttisalia. Marienkirche on Neubrandenburgissa Saksan liittotasavallassa sijaitseva 1200-luvulta peräisin oleva goottilainen katedraali, jota ollaan parhaillaan jälleenrakentamassa 1200-paikkaiseksi konserttisaliksi. Arkkitehtina toimii Arkkitehtitoimisto Pekka Salmi-Oy ja salin akustiikkasuunnittelusta vastaa Henrik Möller ja Tapio Lahti Akukon Oy:stä. Esimerkkigeometria oli akustiikkasuunnittelussa apuna käytetty malli, joka on alunperin tehty ODEON-akustiikkasuunnitteluohjelmistoa varten (Naylor, 1993). Malligeometria on esitetty kuvissa 3.7b ja 6.1.



Kuva 6.1: *Marienkirche-konserttisalin akustiikkasuunnittelussa käytetty malli.*

6.1 Siirtotie ja jälkikaiuntalohkon parametrien arvot

Marienkirchen mallissa on paljon pinta-alaltaan pieniä pintoja. Pintojen lukumäärään (482) nähden näkyviä kuvalähteitä muodostuu erittäin vähän. Näkyvien kuvalähteiden määrien selvittämiseksi tehtiin simulointeja, joiden tulokset ovat taulukossa 6.1. Simuloinneissa käytettiin neljää lähdepistettä ja 18 kuuntelupistettä. Ympärisäteilevät lähdepisteet oli sijoitettu esiintymislavalle ja kuuntelupisteet katsomoon siten, että 14 pistettä oli permannolla ja neljä parvekkeella. Kaikenkaikkiaan saatiin siis 72 lukua, joista etsittiin maksimi- ja minimimäärät sekä laskettiin keskiarvot näkyville kuvalähteille.

Taulukko 6.1: Näkyvien kuvalähteiden määrä Marienkirche-salissa. Keskiarvon keräämistä varten käytettiin neljää äänilähdepistettä ja 18 kuuntelupistettä. Taulukosta nähdään myös näkyvyysmatriisin M (luku 3.3) vaikutus näkyvien kuvalähteiden löytymiseen.

	näkyviä kuvalähteitä	näkyviä näkyvyysmatriisin M kanssa	maksimimäärä	minimimäärä
Kuvalähteitä korkeintaan 1000	7,9	8,0	16	2
Kuvalähteitä korkeintaan 5000	10,3	10,9	20	4
Kuvalähteitä korkeintaan 10000	10,5	12,0	21	4
Kuvalähteitä korkeintaan 60000	14,4	18,0	28	6
Kuvalähteitä korkeintaan 200000	18,1	24,1	46	8
Kuvalähteitä korkeintaan $1,0 \cdot 10^7$	27,2	30,9	49	11
Kuvalähteitä korkeintaan $1,0 \cdot 10^8$	32,3	43,6	69	13

Akustisilta ominaisuuksiltaan erilaisia pintamateriaaleja Marienkirchessä on 14. Näin ollen ensimmäisen kertaluvun kuvalähteitä varten tarvitaan 14 heijastuskerroinsuodinta. Tarvittavien K :n kertaluvun suotimien lukumäärä N_f saadaan kaavasta

$$N_f = \frac{\prod_{i=1}^K [n + (i - 1)]}{K!} \quad (6.1)$$

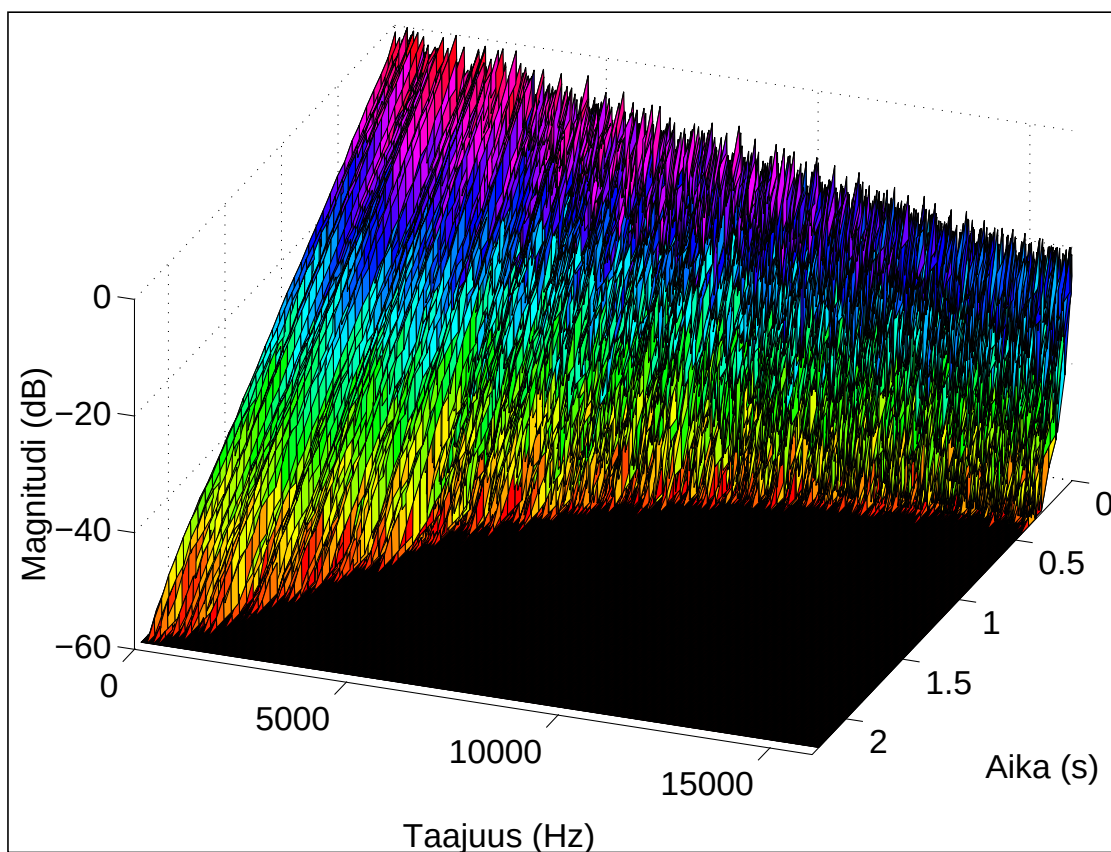
missä n on pintamateriaalien lukumäärä. Toisen kertaluvun suotimia suunniteltiin kaavasta (6.1) saatava määrä eli 105 suodinta. Vastaavasti kolmannen kertaluvun suotimia olisi tarvittu 560.

Heijastuskerroinsuotimet suunniteltiin luvussa 5.5.1 esitettyjen periaatteiden mukaisesti laskemalla sekä ensimmäisen että kolmannen asteen suora muoto II -toteutukset. Esi-merkkejä suotimien taajuusvasteista on kuvassa 5.8. Ilman absorptiosuotimet suunniteltiin vastaavasti luvussa 5.5.2 esitetyllä tavalla. Suunnitteluparametreinä lämpötilalle oli 20°C ja ilman kosteudelle 60%. Kuvassa 5.10 on käytettyjen ilman absorptiosuotimien taajuusvasteet.

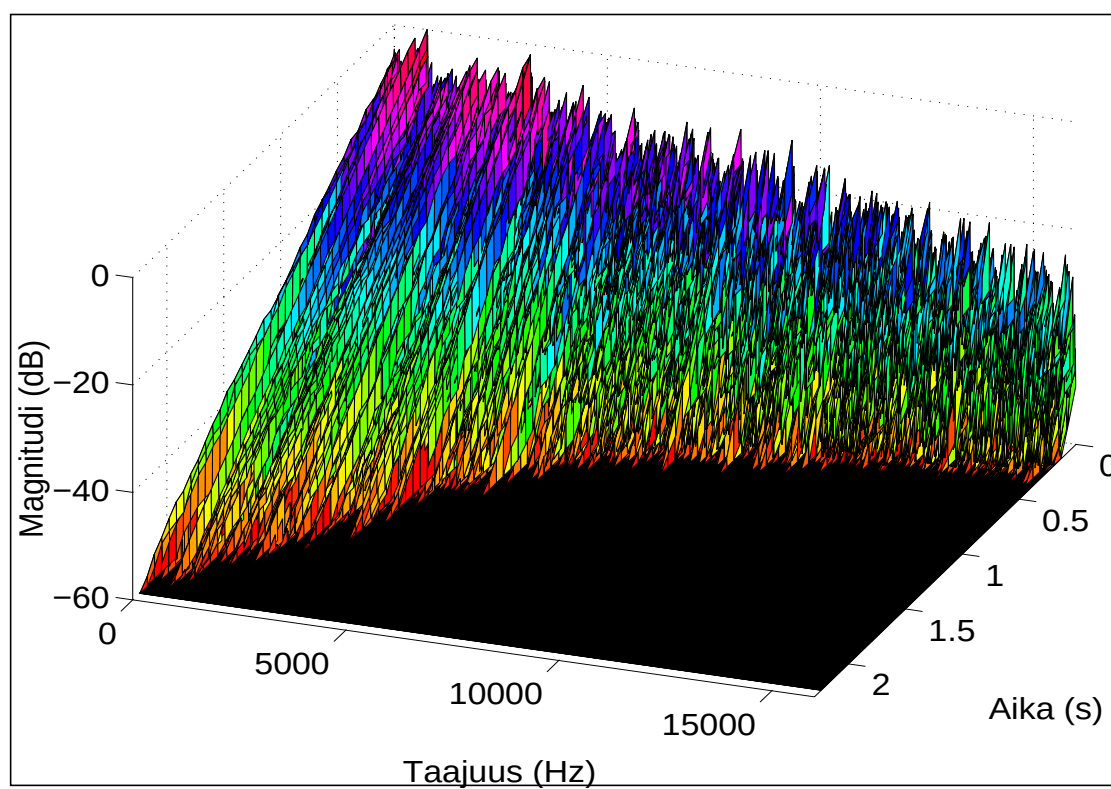
Jälkikaiuntalohkon parametrien arvojen määrittämistä varten ei valitettavasti ole vielä valmiita työkaluja olemassa. Tätä työtä varten arvot määriteltiin pääosin kokeilemalla ja kuuntelemalla. Omien kuuntelukokeiden vahvistukseksi laskettiin EDR-kuvia (energy

decay relief), joita Jot (1992b) on ehdottanut jälkikaiunnan analysointityökaluiksi. EDR-kuva muodostetaan siten, että ensin impulssivasteesta lasketaan lyhyen ajan Fourier-muunnoksia (STFT, short time Fourier transform). Sen jälkeen kullakin taajuudella impulssivastetta integroidaan takaperin, toisin sanoen lasketaan kumulatiivista summaa ajassa taaksepäin. Lopuksi piirretään EDR kolmiulotteiseen kuvaan, josta nähdään mm. kunkin taajuuden vaimeneminen ajan funktiona ja taajuusvasteen tasaisuus halutulla hetkellä. Kuvissa 6.2 ja 6.3 on esimerkkejä EDR-kuvista.

Kuvasta 6.2 nähdään, että toteutettu jälkikaiunta-algoritmi toimii toivotulla tavalla. Taajuusvaste on lähes tasainen ja suuret taajuudet vaimenevat pieniä nopeammin, aivan kuten oikeassa konserttisalissa. Myöskään yksittäiset taajuudet eivät muodosta kuvaan muita korkeampia ja pidempiä harjanteita, jotka kuultaisiin pidempään soivina ääneksinä. Vastaavasti koko auralisointijärjestelmällä tuotettu kuva 6.3 ei ole aivan yhtä hyvä. Taajuusvasteessa on pieniä kuoppia ja muutamat taajuudet soivat liian pitkään. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kaikkien kuvalähteiden tuottamat signaalit syötetään jälkikaiuntalohkoon (kuva 5.2). Jotin (1992b) mukaan jälkikaiuntalohkoon tulisi syöttää vain suora ääni ja riittävän heijastustiheyden tuottamiseksi viivelinjoja pitäisi olla vähintään 16. Toteutuksessa järjestelmässä viivelinjoja on kuitenkin vain neljä ja heijastustiheyttä on kasvatettu syöttämällä kaikkien kuvalähteiden tuottamat signaalit jälkikaiuntalohkoon. Tähän ratkaisuun päädyttiin, jotta järjestelmä toimisi reaaliajassa. Varovaisena johtopäätöksenä voidaan todeta, että reaaliaikaisessa versiossa kohtuulliseen tulokseen päästään neljällä viivelinjalla syöttämällä kaikki kuvalähteet jälkikaiuntalohkoon. Kun laskentakapasiteettia on riittävästi käytössä, kannattaa käyttää 16 viivelinjaa ja syöttää jälkikaiuntalohkoon vain suora ääni.



Kuva 6.2: Jälkikaiunta-algoritmin tuottama EDR-kuva impulssille.

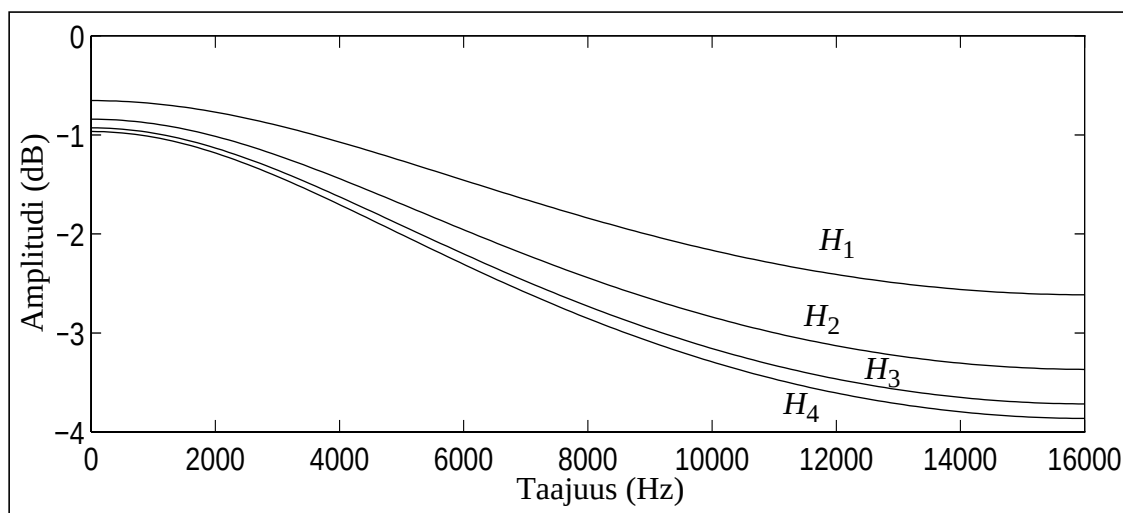


Kuva 6.3: Koko järjestelmän EDR-kuva kuvan 6.5 ylimmästä impulssivasteesta.

Jälkikaiuntalohkossa käytettyjen parametrien arvot on lueteltu taulukossa 6.2. Viivelinjojen pituudet on valittu siten, että ne ovat alkulukuja, jolloin saadaan mahdollisimman tasainen taajuusvaste. Suodinkertoimien b_i ja k_i arvot laskettiin kaavojen (5.2) ja (5.3) mukaisesti. Kuvassa 6.4 on vielä alipäästösuotimien $H_{1-4}(z)$ taajuusvasteet taulukon 6.2 b_i :n ja k_i :n arvoilla.

Taulukko 6.2: Jälkikaiuntalohkossa käytetyt parametrit. Suotimien $H_i(z)$ kertoimet b_i ja k_i on laskettu kaavojen (5.2) ja (5.3) mukaisesti. Jälkikaiunta-aika $T_r(0) = 2,3$ s, näytteenottotaajuus $f_s = 32000$ Hz ja jälkikaiunta-aikojen suhde $\varepsilon = 0,25$.

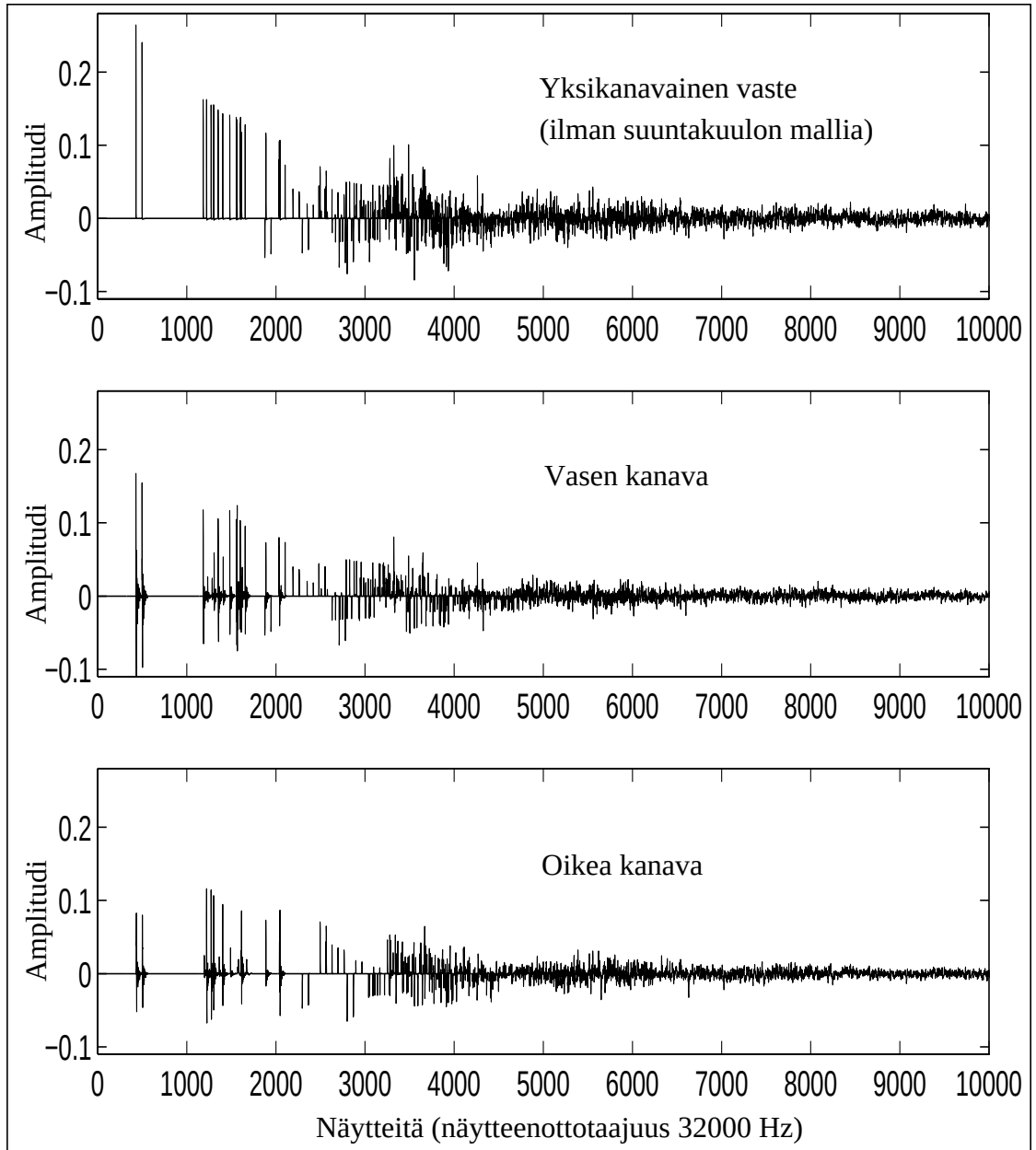
		$H_i(z)$	$H_i(z)$	$A_i(z)$	$A_i(z)$
	z^{-di}	b_i	k_i	z^{-Di}	a_i
Viivelinja 1	1447	0.222054	0.86024	157	0,5
Viivelinja 2	1867	0.282924	0.823736	199	0,5
Viivelinja 3	2053	0.310398	0.807356	227	0,5
Viivelinja 4	2131	0.321802	0.800565	239	0,5



Kuva 6.4: Suotimien $H_{1-4}(z)$ taajuusvasteet taulukon 6.2 parametrien arvoilla.

Jälkikaiuntalohkoon syötettävän signaalin voimakkuutta säätelevä kerroin $b(r)$ laskettiin kaavasta (5.1). $Gain_{dc}$:n ja $Gain_{ac}$:n arvot etsittiin kokeilemalla ja tutkimalla impulssivasteita, jotka oli laskettu kuuntelupisteissä eri puolilla Marienkircheä. Kertoimien arvot sovitettiin siten, että viimeiset varhaiset heijastukset ja ensimmäiset jälkikaiunnan ulostulot olivat amplitudiltaan suunnilleen yhtä suuria joka puolella salia. Käytetyt vahvistuskertoimet olivat $Gain_{dc} = 0,22$ ja $Gain_{ac} = 0,016$.

Kuvassa 6.5 on järjestelmällä tuotetut impulssivasteet yhdelle lähde-kuuntelupisteparille. Kuvista nähdään hyvin kuvalähdemenetelmän suuri puute, diffuusien heijastusten puuttuminen. Erityisen selvästi tämä näkyy varhaisten heijastusten aikana, jolloin oikeassa salissa kuullaan myös muita kuin peliheijastuksia. Varhaisten diffuusien heijastusten puuttumisen vaikutuksesta syntyvään kuuloaistimukseen ei ole tehty kuuntelukokeita, joten vielä ei voida sanoa, kuinka paljon todenmukaisemmalta kuulostaisi mallinnusmenetelmä, joka mallintaisi myös diffuusit heijastukset.



Kuva 6.5: Toteutetun järjestelmän impulssivasteita yhdelle lähde-kuuntelupisteparille kuvan 6.1 Marienkirche-konserttisalissa. Kyseisessä pisteessä on suoran äänen lisäksi näkyviä kuvalähteitä 22 kappaletta.

6.2 Demonstraatiovideo

Arkkitehtitoimisto Pekka Salminen Oy:n tilauksesta tehtiin Marienkirche-konserttisalista demonstraatiovideo, johon laskettiin toteutulla järjestelmällä auralisoitu ääniraita. Demonstraatiovideon ansioituneen visualisoinnin ja lopullisen editoinnin teki rakennusarkkitehti Erkki Rousku. Visualisoinnissa käytetty konserttisalin malli oli liian tarkka ja monimutkainen akustiikan laskemista varten. Auralisoinnissa käytettiin akustiikkasuunnittelua varten tehtyä mallia (kuva 6.1). Demonstraatiovideo kestää noin kolme ja puoli minuuttia ja siinä liikutaan ympäri salia niin, että kuulokuva muuttuu katselijan paikan ja katselukulman mukaan.

Äänilähteenä tuotetussa videossa käytettiin pianomusiikkia, koska tietokoneanimaatiossa äänilähdettä visualisoitiin lavalle sijoitetulla flyygelillä. Valitettavasti kaiuttomassa huoneessa äänitettyjä flyygelillä soitettuja pianokappaleita ei ollut saatavilla, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jäi käyttää synteettistä ääntä. Heräte tehtiin Rolandin A-90 MIDI Controller -syntetisaattorilla, jota ohjattiin MIDI:llä. Näin saatiin lähes aidolta kuulostava heräte, jolla päästiin hyväksyttävään lopputulokseen.

Siirtotien mallinnuksessa laskettiin kaikki ensimmäisen ja toisen kertaluvun kuvalähteet. Niiden löytämiseksi jouduttiin käymään 120 000 kuvalähdettä läpi. Näkyviä näistä oli kerrallaan kolmesta 25:een. Kuvalähteiden päivitystaajuutena käytettiin 25 Hz:ä, joka oli myös visualisoidun kuvan päivitystaajuus. Kuuntelijan mallintamisessa käytettiin mitatuista HRTF:sta suunniteltuja astelukua 60 olevia minimivaiheisia FIR-suotimia sekä suoralle äänelle että kaikille kuvalähteille.

Kaiken kaikkiaan tehty demonstraatiovideo onnistui erinomaisesti. Virtuaalinen ääniympäristö kuulostaa hyvin konserttisalimaiselta ja tilavaikutelma on erittäin laaja. Aistittua virtuaaliääniympäristöä parantaa vielä erittäin vaikuttava tietokoneanimaatio, jonka seuraaminen kuunneltaessa tekee kuuloaistimuksesta paljon todenmukaisemman. Demonstraatiovideosta tehtiin vain kuulokkeilla kuunneltava versio.

6.3 Reaaliaikaisen järjestelmän suorituskyky

Virtuaaliääniympäristön toteuttavan reaaliaikaisen ohjelman suorituskykyä pyrittiin mittaamaan analysoimalla eri funktiokutsuille kuluvia aikoja. Näin saatiin karkea arvio siitä, mitkä ohjelmalohkot tarvitsevat eniten prosessoriaikaa. Testiajossa liikuttiin Marienkirche-mallissa siten, että noin 10 kuvalähdettä oli jatkuvasti näkyvissä. Näistä suoran äänen osalta HRTF-suodatus toteutettiin astelukua 30 olevalla FIR-suotimella ja kuvalähteiden

osalta astelukua 10 olevalla FIR-suotimilla. Kuvalähteiden etsintää ja näkyvyystarkasteluja tekevää ohjelmaa käytettiin toisessa työasemassa, joten kokeella tarkasteltiin vain kuvan 5.2 mukaisen järjestelmän suorituskykyä.

Yleisesti voidaan todeta, että kaikki päivitykset eli kuvalähteiden, suodinkertoimien ja viiveiden päivitykset eivät ole laskentatehon kannalta ongelmallisia, koska päivityksiä tehdään harvoin, vain 20 kertaa sekunnissa. Sen sijaan jokaisen näytteen käsittely vie laskentatehoa, koska näytteitä on 32 000 sekunnissa. Ääninäytteiden lukeminen tiedostosta tai audiosisäänmenosta, samoin kuin kirjoittaminen takaisin audioulostuloon on hidasta. Tästä syystä ääninäytteitä on käsiteltävä jaksoissa, jotta lukemista ja kirjoitusta ei tehdä jokaiselle näytteelle erikseen.

Tässä tapauksessa sopivan pituinen jakso löydettiin kokeilemalla, jolloin päädyttiin 50 ms pituisiin jaksoihin. Tällaisen jakson pituus, eli puskurin koko, tuo tietenkin pientä lisäviivettä koko järjestelmään, mutta kuten luvussa 5 todettiin, ei käytettyä 100 ms kokonaisviivettä vielä koeta häiritseväksi.

Ehdottomasti eniten laskentakapasiteettia vaativat jokaiselle näytteelle tehtävät operaatiot. Näistä eniten laskentatehoa tarvitsee kuvalähteiden spatiaalinen käsittely eli HRTF-suodatus. Se vie prosessoriajasta lähes puolet edellä kuvatussa testitilanteessa. Toinen suuri prosessoriajan kuluttaja on erilaiset interpoloinnit. Kuten luvussa 5.3 todettiin, täytyy muuttuvia parametreja kuten kuvalähteitä ja vahvistuskertoimia interpoloida kahden peräkkäisen päivityksen välillä. Viiveiden interpolointi vaatii vielä murtoviiveiden toteutuksen eli interpoloinnit on suoritettava kahden peräkkäisen näytteen välillä. Kaikkien näiden interpolointikertoimien laskeminen ja käyttäminen vie prosessoriajasta noin 25%. HRTF-suodatus ja erilaiset interpoloinnit vievät yhteensä noin 75% laskentatehosta ja loput 25% jakautuu siten, että seinien ja ilman absorption toteuttavat suotimet vievät noin 10%, jälkikaiuntalohko noin 8% ja muut operaatiot noin 7%.

Demonstraatiovideota tehdessä käytettiin luonnollisesti järjestelmän ei-reaaliaikaista versiota, jotta pystyttiin prosessoimaan useampia kuvalähteitä ja käyttämään tarkempia mallinnusmenetelmiä kuin reaaliaikaisessa versiossa. HRTF-suodatusta sekä suoralle äänelle että kuvalähteille tehtiin astelukua 60 olevilla FIR-suotimilla. Näkyviä kuvalähteitä oli keskimäärin 15-20 ja seinien heijastuskertoimille käytettiin kolmannen asteen IIR-suodintoteutusta. Näillä parametreilla minuutin pituista auralisointia ääntä yksi Silicon Graphics Octane -työasema laski noin kymmenen minuuttia.

6.4 Järjestelmän verifiointi akustisten tunnuslukujen avulla

Toteutetun järjestelmän tuottamia tuloksia on vaikea verifioida muuten kuin kuuntelemalla. Tulevaisuudessa järjestelmän parametrien arvojen löytämiseksi tulisikin tehdä kuuntelukokeita, joiden antamien tulosten avulla voidaan virtuaaliääniympäristö toteuttaa mahdollisimman hyvin vastaamaan oikean konserttisalin ääniympäristöä.

Eräs tapa arvioida konserttisaleja on laskea saleissa mitatuista impulssivasteista akustisia tunnuslukuja. Niinpä toteutetulla järjestelmällä tehtiin kahdeksan impulssivastetta, joista laskettiin muutamia tunnuslukuja. Niiden tarkoituksena on osoittaa, että järjestelmän tuottamat vasteet vastaavat edes jollakin tavalla oikeiden konserttisalien vasteita. Kun Marienkirche-konserttisali vuoden 1999 lopulla valmistuu, on mielenkiintoista verrata simuloituja tunnuslukuja salissa mitattuihin lukuihin.

6.4.1 Huoneakustiikan tunnusluvut

Konserttisalin akustiikkaa voidaan kuvailla monella eri tavalla. Subjektiiiviset eli oma-kohtaiset arviot perustuvat aina henkilökohtaisiin mieltymyksiin. Yleisesti akustiikaltaan hyväksi luokiteltu sali saattaa kuulostaa jonkun korvaan epämiellyttävältä, esimerkiksi kuivalta ja etäiseltä. Konserttisaleja on pyritty kuitenkin kuvailemaan joillakin objektiivisilla tunnusluvuilla, mutta kaiken kattavaa mittaria konserttisalien laadun arviointiin ei ole löydetty. Beranek (1996) on kirjassaan laajasti tutkinut maailman konserttisaleja ja listannut yleisesti käytössä olevia objektiivisia tunnuslukuja, joilla konserttisalien akustiikkaa pyritään kuvailemaan (taulukko 6.3).

Taulukko 6.3: Beranekin (1996) mukaan yleisesti hyväksytyjä objektiivisia saliakustiikan tunnuslukuja.

nimi englanniksi ja suomeksi	symboli	kuvaus
<i>strength</i> , kokonaisäänipainetaso	G	Mittauspisteen kohdalla mitatun äänipainetason ja 10 metrin päässä äänilähteestä vapaassa kentässä mitatun äänipainetason erotus.
<i>reverberation time</i> , jälkikaiunta-aika	RT	Aika, jossa äänipainetaso vaimenee 60 dB laskettuna suoralta, joka on sovitettu salin impulssivasteen arvoihin välillä $RT(t_{-5dB}) \dots RT(t_{-25dB})$ tai $RT(t_{-35dB})$.
<i>early decay time</i> , aikainen vaimenemisaika	EDT	Aika, jonka aikana äänikenttä vaimenee 60 dB laskettuna suoralta, joka on sovitettu salin impulssivasteen arvoihin välillä $RT(t_{-0dB}) \dots RT(t_{-10dB})$.
<i>clarity</i> , selvyys	C_{80}	Varhaisten heijastusten (ennen 80 ms) ja jälkikaiunnan energioiden suhde.
<i>apparent source width</i> , äänilähteen auditorinen leveys	$IACC_{early}$ tai ASW	Äänilähteen aiheuttaman äänikentän leveys, jonka yleisön joukossa istuva kuuntelija aistii.
<i>listener envelopment</i> , kuuntelijan tilavaikutelma	$IACC_{late}$ tai LEV	Kuuntelijan subjektiivinen tilavaikutelman tunne eli korvien välinen ero jälkikaiunnassa.
<i>lateral energy fraction</i> , poikittaisen energian osuus	LEF tai LF	Poikittaisen energian osuus kuvastaa poikittaisten (sivusta tulevien) heijastusten energiasuhdetta impulssivasteen kokonaisenergiaan.
<i>initial-time-delay gap</i>	ITDG tai t_l	Suoran äänen ja ensimmäisen heijastuksen välinen aika.
<i>bass ratio</i> , basso-suhde	BR	Pienten taajuuksien (125 Hz ja 250 Hz) jälkikaiunta-ajan suhde keskitaajuuksien (500 Hz ja 1000 Hz) jälkikaiunta-aikaan.
<i>stage support</i> , tuenta	ST_{early} , ST_{late} ja ST_{total}	Tuenta pyrkii kuvailemaan sitä, kuinka soittajat kuulevat toisensa sekä salin jälkikaiunnan.

6.4.2 Lasketut tunnusluvut

Toteutetulla järjestelmällä tuotettiin impulssivasteita, joista laskettiin muutamia taulukossa 6.3 esiteltyjä akustisia tunnuslukuja. Näitä olivat RT, EDT, C_{80} , ASW ja LEV. Tunnuslukujen laskentakaavat ovat Beranekin (1996) kirjasta ja laskenta suoritettiin Matlab-ohjelmistolla.

RT ja EDT laskettiin siten, että ensin impulssivastetta suodatettiin oktaavikaistoittain. Sen jälkeen vasteita integroitiin takaperin, mikä tarkoittaa, että neliöidylle impulssivasteelle

laskettiin lopusta alkuun päin kumulatiivista summaa, ja lopputuloksena saatiin monotonisesti laskeva käyrä. Kun amplitudi muutettiin vielä logaritmiseksi, saatiin lineaarisesti laskeva käyrä, johon sovitetiin pienimmän neliösumman menetelmällä laskeva suora. Tältä suoralta etsittiin RT:n laskemiseksi -5 dB:n ja -25 dB:n pisteet. Näiden pisteiden välinen aika kerrottiin kolmella, jolloin saatiin lopullinen jälkikaiunta-aika eli aika, jossa ääni vaimenee 60 dB. EDT laskettiin vastaavasti, mutta suoralta etsittiin vain -10 dB:n piste ja EDT:n määrittämiseksi tämän pisteen ja suoran äänen välinen aika kerrottiin kuudella. RT kuvaa ehkä parhaiten salin elävyyttä sekä täyteläisyyttä ja sen fyysisiä mittoja, kun taas EDT kuvaa subjektiivisesti tärkeiden varhaisten heijastusten merkitystä (Beranek, 1996 s. 29-30).

Selvyysluku C_{80} kuvaa salin kykyä erotella eri äänet toisistaan. Selvyysluku määritellään varhaisten heijastusten ja jälkikaiunnan energioiden suhteena ja se laskettiin kaavasta

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (6.2)$$

missä $p(t)$ on äänipaine mittauspisteessä.

Tilavaikutelman (engl. spatial impression) selvittämiseksi laskettiin kaksi korvien väliseen ristikorrelaatioon (IACC, interaural cross correlation) perustuvaa tunnuslukua. Äänilähteen auditorinen leveys ASW laskettiin kaavasta

$$ASW = \max \left| \frac{\int_0^{0.08} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_0^{0.08} p_L^2(t) dt \int_0^{0.08} p_R^2(t) dt}} \right| \text{ kun } -1 < \tau < +1 \text{ ms} \quad (6.3)$$

ja kuuntelijan tilavaikutelman tunne LEV kaavasta

$$LEV = \max \left| \frac{\int_{0.08}^{1.0} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{0.08}^{1.0} p_L^2(t) dt \int_{0.08}^{1.0} p_R^2(t) dt}} \right| \text{ kun } -1 < \tau < +1 \text{ ms} \quad (6.4)$$

joissa $p_L(t)$ ja $p_R(t)$ ovat vasemman ja oikean korvakäytävän suulta mitatut äänipaineet. Viiveen τ arvon vaihtelu -1 ja +1 millisekunnin välillä on riittävää, koska korvien välinen aikaero on suurimmillaankin alle yhden millisekunnin.

Marienkirchen mallissa tuotetuista kahdeksasta (kaksi lähde- ja neljä kuuntelupistettä) impulssivasteesta lasketut tunnusluvut ovat taulukossa 6.4.

Taulukko 6.4: Laskettuja akustisia tunnuslukuja. Luvut ovat keskiarvoja kahdeksasta vasteesta (kaksi lähde- ja neljä kuuntelupistettä).

tunnusluku	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RT (s)	2,2	2,2	2,1	2,1	1,9	1,4
EDT (s)	2,1	2,0	2,0	1,9	1,6	1,1
C ₈₀ (dB)	- 1,2	- 0,5	- 0,7	- 0,5	0,4	2,4
ASW (korr.)	0,38	0,30	0,32	0,24	0,30	0,22
LEV (korr.)	0,08	0,08	0,08	0,09	0,06	0,06

Beranek (1996) on kirjassaan tutkinut 76 konserttisalia. Hän on haastatellut muusikoita, musiikkikriitikoita ja akustikkoja sekä vertaillut kyseisissä saleissa tehtyjä mittauksia ihmisten subjektiivisiin mielipiteisiin. Näiden tutkimusten pohjalta hän on päätenyt siihen tulokseen, että maailman parhaiden konserttisalien jälkikaiunta-aika RT keskitaajuuksilla (500 Hz ja 1000 Hz) on noin kaksi sekuntia. Vastaavasti EDT:n keskiarvo hyvissä konserttisaleissa on 2,2 sekuntia. Vertaamalla simuloituja tuloksia Beranekin (1996) lukuihin voidaan todeta, että toteutettu järjestelmä antaa hyviä tuloksia. Diffuusien heijastusten puuttuminen varhaisten heijastusten välistä luultavasti pienentää EDT:n arvoa, joka voisi olla suurempi. Samoin oktaavikaistalla, jonka keskitaajuus on 4000 Hz RT:n ja EDT:n arvot ovat hieman liian lyhyitä. Niitä voisi säätää pidemmiksi muuttamalla jälkikaiuntalohkon parametria ϵ , jolloin lasketut tunnusluvut vastaisivat oikeista konserttisaleista laskettuja lukuja. Selvyysluvun C₈₀ arvot vaihtelevat oikeissa konserttisaleissa -4:n ja +4:n desibelin välillä. Yleisesti saleissa, jossa jälkikaiunta-aika on 2,1 sekuntia, selvyysluvun tulisi olla noin -2,5 desibeliä keskitaajuuksilla (Beranek, 1996).

Tilavaikutelmaa kuvaavat tunnusluvut ASW ja LEV perustuvat eri korvilla kuultavien signaalien eroihin. ASW kuvaa äänilähteen aiheuttaman äänilähteen leveyttä. Äänilähteen tuottama äänikenttä kuullaan mahdollisimman leveänä, jos varhaisia heijastuksia tulee kuuntelijan korviin sivulta. Näin ollen mitä pienempi ASW:n arvo on, sitä leveämmältä ja paremmalta subjektiivisesti arvioituna konserttisalissa aistittu ääni kuulostaa. LEV taas kuvaa sitä, kuinka hyvin aistittu äänikenttä ympäröi kuulijaa.

Beranekin (1996) mukaan maailman parhaissa konserttisaleissa on ASW:n keskiarvo keskitaajuuksilla (500, 1000 ja 2000 Hz) 0,3:n ja 0,4:n välissä. Vastaavasti LEV:n keskiarvo keskitaajuuksilla on 0,12. Vertaamalla näitä lukuja taulukon 6.4 lukuihin nähdään, että toteutun järjestelmän virtuaaliääniympäristössä on erittäin hyvä tilavaikutelma. Vain pienillä taajuuksilla LEV:n ja ASW:n arvot poikkeavat oikeissa konserttisaleissa mitatuista arvoista.

Vertailemalla taulukon 6.4 tunnuslukuja oikeissa konserttisaleissa mitattuihin tunnuslukuihin voidaan todeta, että järjestelmällä luotu virtuaaliääniympäristö on ainakin objektiivisten tunnuslukujen mukaan oikean ääniympäristön kaltainen. Näiden tulosten perusteella on erittäin mielenkiintoista odotella Marienkirchen rakennustöiden valmistumista, jotta päästään vertaamaan matemaattisesta mallista tässä työssä toteutetulla järjestelmällä laskettuja akustisia tunnuslukuja konkreettisessa salissa mitattaviin tunnuslukuihin.

Tässä työssä on toteutettu vuorovaikuttaisen virtuaaliääniympäristön tuottava järjestelmä, jonka avulla voidaan kuunnella tietokoneella mallinnettuja mielivaltaisia tiloja, esimerkiksi konserttisaleja. Äänilähteen, akustisen siirtotien ja kuuntelijan mallintamismenetelmiä, joita tarvitaan virtuaaliääniympäristön luomisessa, on esitelty yleisesti ja tähän työhön valittuja menetelmiä on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin.

Luvussa 2 on käyty läpi yleisesti käytössä olevia huoneakustiikan laskennallisia menetelmiä. Tähän työhön valittua kuvalähdemenetelmää käsitellään tarkemmin luvussa 3. Ensin on johdettu kuvalähdemenetelmän fysikaalinen perusta ja sen jälkeen esitellään toteutuksessa huomioitavia seikkoja. Myös menetelmän puutteista ja rajoituksista keskustellaan ja muutamia algoritmeja puutteiden kompensoimiseksi esitellään. Luvussa 4 on pohdittu virtuaaliääniympäristöjen kuuntelumahdollisuuksia ja kerrottu mahdollisista auralisointimenetelmistä. Myös reaaliaikaisten ja vuorovaikutteisten auralisointijärjestelmien ongelmia ja toteutusmahdollisuuksia on esitelty.

Toteutettu virtuaaliääniympäristön tuottava järjestelmä on käyty läpi yksityiskohtaisemmin luvussa 5. Ensin on esitelty auralisointijärjestelmän yleiskuvaus sekä lohkokaavio. Sen jälkeen on kerrottu kuvalähteiden interpoloinneista, jotka mahdollistavat vuorovaikuttaisen liikkumisen mallinnetussa tilassa siten, että kuultavassa äänessä ei ole diskreetteistä muutoksista aiheutuvia epäjatkuvuuskohtia. Tämän jälkeen kaikkien kolmen osa-alueen — äänilähteen, siirtotien ja kuuntelijan — mallinnusmenetelmien toteutukset on kuvailtu siten, että auralisointijärjestelmän lohkokaavion jokainen osa tulee käytyä läpi.

Luvussa 6 on raportoitu tapaustutkimuksena tehdyn Marienkirche-konserttisalin virtuaaliääniympäristön luomista. Käytettyjen laskentaparametrien arvot on esitelty ja perusteltu sekä tehdyn demonstraatiovideon tuottamista on kuvattu. Lopuksi on pohdittu vielä reaaliaikaisen järjestelmän suorituskykyä sekä vertailtu auralisointijärjestelmällä toteutetuista impulssivasteista laskettuja akustisia tunnuslukuja yleisesti hyvänä pidettyihin tunnuslukuihin.

Tässä työssä on esitetty yksi tapa toteuttaa vuorovaikutteinen virtuaaliääniympäristö. Toistaiseksi ei kirjallisuudessa ole esiintynyt muita toteutetun kaltaisia järjestelmiä. Vuorovaikutteista virtuaaliääniympäristöä tuottavien ohjelmistojen puute johtuu luultavasti siitä, että niiden luominen vaatii kaikkien kolmen osa-alueen — äänilähteen, akustisen siirtotien ja kuuntelijan — tehokkaita mallinnusmenetelmiä. Etenkin akustisen siirtotien mallinnusmenetelmien monimutkaisuus on varmasti vaikuttanut virtuaaliääniympäristöjärjestelmien puuttumiseen.

Kuvalähdemenetelmä on akustiikan laskennallinen menetelmä, joka parhaiten sopii reaaliaikaikaiseen ja vuorovaikutteiseen auralisointiin. Kuvalähdemenetelmän avulla voidaan mallintaa suoran äänen lisäksi varhaiset heijastukset siten, että heijastusten tulosuunta havaitaan, jolloin ihmisen kuulojärjestelmä luo mielikuvan mallinnettavasta tilasta. Keinotekoisella jälkikaiunta-algoritmillä voidaan muodostaa varhaisten heijastusten jälkeen syntyvät heijastukset sekä diffuusi, kuuntelijaa ympäröivä äänikenttä, jolloin virtuaalinen ääniympäristö kuulostaa mahdollisimman luonnolliselta.

Vaikka kuvalähdemenetelmä mallintaa ääniaaltojen käyttäytymistä erittäin karkealla tavalla, voidaan menetelmän avulla luoda kuuntelijalle mallinnettavasta tilasta todellisuutta vastaava mielikuva. Tämä perustuu siihen, että ihminen luo mielikuvan ympäristöstään suoran äänen ja ensimmäisten heijastusten perusteella. Kuvalähdemenetelmällä ei kuitenkaan pystytä mallintamaan varhaisten heijastusten aikana korviin saapuvia diffuuseja heijastuksia. Tulevaisuudessa kuvalähdemenetelmään tulisi kehittää diffuuseja heijastuksia mallintava algoritmi.

Toistaiseksi ei tarkkaan tiedetä, miten virtuaaliääniympäristön havaitsemiseen vaikuttaa kuvalähteiden määrä sekä niiden ajallinen ja spatiaalinen jakautuminen. Näiden selvittämiseksi on tehtävä kuuntelukokeita ja psykoakustisia tutkimuksia. Muita kuuntelukokeita vaativia tutkimuskohteita ovat latenssin ja päivitystaajuuden vaikutus havaittavaan ääneen sekä jälkikaiuntalohkon parametrien määrittäminen siten, että mallinnettu jälkikaiunta olisi missä tahansa virtuaalisessa tilassa luonnollinen.

Toteutettua järjestelmää voidaan kuunnella tällä hetkellä vain binauraalisesti kuulokkeilla tai kaiutinkompensoidusti kaiutinparilla. Kaiutinkompensoidussa binauraalisessa kaiutinkuuntelussa virtuaaliääniympäristö havaitaan vain pienellä kuuntelualueella symmetriakselilla, josta etäisyys kumpaankin kaiuttimeen on yhtä suuri. Näin ollen kaiutinkompensoitu binauraalinen äänentoistojärjestelmä ei ole hyvä, kun halutaan luoda virtuaaliääniympäristö useammalle kuuntelijalle samanaikaisesti.

Vaikka monikanavakuuntelujärjestelmä vaatii suuren kuuntelutilan ja paljon kaiuttimia, sillä on myös etunsa. Ensinnäkin virtuaaliääniympäristö voidaan tuottaa usealle kuuntelijalle samanaikaisesti ja toiseksi suuntakuulon mallintamista ei tarvita. Tällä hetkellä monikanavakuuntelujärjestelmistä mielenkiintoisin on ehkä Pulkin (1997) kehittämä VBAP-panorointi. Sen avulla kaikki kuvalähteet voidaan sijoittaa minne hyvänsä kaiuttimien kattamalla alueella, jolloin jokainen varhainen heijastus saadaan kuulumaan juuri oikeasta suunnasta. Virtuaaliääniympäristön tuottamista jo vakiintuneisiin monikanavajärjestelmiin, kuten elokuvateollisuudessa käytössä olevaan 5+1 järjestelmään, tulisi myös

kehittää. Tällöin virtuaaliääniympäristöjä voitaisiin luoda elokuvateattereissa esitettäviin animaatioihin ja elokuviin.

Tämän diplomityön aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja haastava. Mielenkiintoiseksi työn teki se, että työn tuloksia voidaan kuunnella, ja arvioida subjektiivisesti, vastaako luotu konserttisalin virtuaaliääniympäristö todellisessa salissa aistittua ääniympäristöä. Työ oli myös monipuolinen, sillä virtuaaliääniympäristön toteuttamisessa vaadittiin psyko- ja huoneakustiikan tuntemusta, digitaalisen signaalinkäsittelyn hallintaa sekä reaaliaikaisen audiojärjestelmän ohjelmointia.

LÄHDEVIITTEET

- Ando, Y. 1985. Concert Hall Acoustics. Berlin. Springer-Verlag. 151 s.
- Allen, J. B.; Berkley, D. A. 1979. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. Journal of Acoustical Society of America. vol 65. nr. 4. April 1979. s. 943-950.
- Barron, M. 1993. Auditorium Acoustics and Architectural Design. London. England. E & FN Spon. 443 s.
- Begault, D. R. 1994. 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia. Cambridge. Academic Press Inc. 293 s.
- Beranek, L. 1996. Concert and Opera Halls — How They Sound. New York. Acoustical Society of America. 643 s.
- Blauert, J. 1983. Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localization. Cambridge. Massachusetts. USA. MIT Press. 427 s.
- Borish, J. 1984. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. Journal of Acoustical Society of America. vol 75. nr. 6. June 1984. s. 1827-1836.
- Botteldooren, D. 1995. Finite-difference time-domain simulation of low frequency room acoustics problems. Journal of Acoustical Society of America. vol 98. nr. 1. December 1995. s. 3302-3308.
- Dalenbäck, B-I. 1995. A New Model for Room Acoustics Prediction and Auralization. Vältöskirja. Chalmers University of Technology. Göteborg.
- Delany, M. E.; Bazley, E. N. 1970. Monopole radiation in the presence of an absorbing plane. Journal of Sound and Vibration. vol 13. nr. 3. November 1970. s. 269-279.
- Diva, 1997. Digital interactive virtual acoustics. Teknillinen korkeakoulu. Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio. Espoo. <URL:<http://www.tcm.hut.fi/Research/DIVA/>>
- Gardner, W. G. 1994. Efficient convolution without input/output delay. An Audio Engineering Society Preprint 3897. 97th Convention, 1994. November. San Francisco.
- Heinz, R. 1993. Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail. Applied Acoustics. vol. 38. Special Issue on Computer Modeling and Auralisation of Sound Fields in Rooms. s. 145-159.
- Huopaniemi, J.; Karjalainen, M.; Välimäki, V.; and Huottilainen, T. 1994. Virtual instruments in virtual rooms — A real-time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments. The Proceedings of ICMC'94. Århus. Denmark. September 12-17. 1994. s. 455-462.

- Huopaniemi, J. 1995. HRTF-suotimien suunnittelumenetelmät ja reaaliaikainen toteutus. s. 79-98. In: Backman, J.; Huopaniemi, J.; Rahkila, M. (toim.). Tilakuuleminen ja auralisaatio. Raportti 36. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 175 s.
- Huopaniemi, J. 1997a. Modeling of Human Spatial Hearing in the Context of Digital Audio and Virtual Environments. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 101 s.
- Huopaniemi, J.; Savioja, L.; Karjalainen M. 1997b. Modeling of reflections and air absorption in acoustical spaces — A digital filter design approach. IEEE 1997 Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. Mohonk. New Paltz. New York. October 19-22.
- Huopaniemi, J.; Karjalainen M. 1997c. Review of digital filter design and implementation methods for 3-D sound. An Audio Engineering Society Preprint 4461 (I4). 102th Convention, 1997. March 22-25. Munich.
- Huopaniemi, J. 1997d. Keskustelut tekn. lis. Jyri Huopaniemen kanssa kesällä 1997.
- Iida, K.; Ando, Y. 1986. Expansion of the image method for acoustical desing of auditoria. Proceedings of the 12th I.C.A., Toronto, Canada, July 1986, E11-3.
- ISO 9613-1. 1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. s. 377-385.
- ISO/IEC JTC/SC29/WG11 N1199. 1996a. MPEG-4 synthetic/natural hybrid coding development of media model standards.
<URL: <http://www.es.com/mpeg4-snhc/Docs/N1199.html>>
- ISO/IEC CD 14772. 1996b. The virtual reality modeling language specification, version 2.0.
<URL: <http://vrm1.sgi.com/moving-worlds/spec/index.html>>
- Jot, J.; Chaigne, A. 1991. Digital delay networks for designing artificial reverberators. An Audio Engineering Society Preprint 3030 (E-2). 90th Convention, 1991. February 19-22. Paris.
- Jot, J. 1992a. Etude et Realisation d'un Spatialisateur de Sons par Modeles Physique et Perceptifs. Väitöskirja. l'Ecole Nationale Superieure des Telecommunications. Telecom. Paris. 221 s.
- Jot, J. 1992b. An analysis/synthesis approach to real-time artificial reverberation. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). vol II. 1992. San Fancisco. s. 221-224.
- Jot, J.; Larcher, V.; Warusfel, O. 1995. Digital signal processing issues in the context of binaural and transaural stereophony. An Audio Engineering Society Preprint 3980 (I6). 98th Convention, 1995. February 25-28. Paris.

- Karjalainen, M.; Välimäki, V. (toim.), 1995a. Akustisten järjestelmien diskreettiaikaiset mallit ja soittimien mallipohjainen äänisynteesi. Raportti 39. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 174 s.
- Karjalainen, M.; Huopaniemi, J.; Välimäki, V. 1995b. Direction-dependent physical modeling of musical instruments. Proceedings of the 15th I.C.A., Trondheim. Norway. June 26-30. s. 451-455.
- Kistler, D.; Wightman, F. 1992. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. Journal of Acoustical Society of America. vol 91. nr. 3. s. 1637-1647.
- Kleiner, M.; Dalenbäck, B.; Svensson, P. 1993. Auralization — An overview. Journal of the Audio Engineering Society. vol 41. nr. 11. November 1993. s. 861-875.
- Kleiner, M.; Granier, E. 1995. Experimental auralization of car audio installations. An Audio Engineering Society Preprint 3952 (D2). 98th Convention, 1995. February 25-28. Paris.
- Kovitz, P. S. 1992. Including diffraction effects in image method solutions for sound fields in arbitrarily shaped rooms. An Acoustical Society of America. 124h Meeting. New Orleans. October 1992. Esitelmä 3aAA8. (Vain abstrakti saatavilla)
- Kristiansen, U. R.; Krokstad, A.; Follestad, T. 1993. Extending the image method to higher-order reflections. Applied Acoustics. vol. 38. Special Issue on Computer Modelling and Auralisation of Sound Fields in Rooms. s. 195-206.
- Krokstad, A.; Strom, S.; Sorsdal, S. 1968. Calculating the acoustical room response by the use of ray tracing technique. Journal of Sound and Vibration. vol. 8. nr. 1. s. 118-125.
- Kuttruff, H. 1991. Room Acoustics. 3. painos. England. Elsevier Science Publishers LTD. 329 s.
- Laakso, T.I.; Välimäki, V.; Karjalainen, M.; Laine, U.K. 1996 Splitting the unit delay — Tools for fractional delay filter design. IEEE Signal Processing Magazine. vol. 13. nr. 1. January 1996. s. 30-60.
- Lahti, T. 1995. Akustinen mittaustekniikka. Raportti 38. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 152 s.
- Lehnert, H.; Blauert, J. 1992. Principles of binaural room simulation. Applied Acoustics. vol. 36. s. 259-291.
- Marienkirche. 1997. Marienkirche-konserttisali. Arkkitehtitoimisto Pekka Salminen Oy. Helsinki. <URL: <http://www.medios.fi/pes/neu/index.htm>>
- Meyer, J. 1978. Acoustics and the Performance of Music. Germany. Verlag Das Musikinstrument. Frankfurt am Main. 237 s.

- Möller, H.; Sörensen, M. F.; Hammershöi, D.; Jensen, C. B. 1995. Head-related transfer functions of human subjects. *Journal of the Audio Engineering Society*. vol. 43. nr. 5. s. 300-321.
- Morse, P. M.; Ingard, K. U. 1968. *Theoretical Acoustics*. USA. McGraw-Hill Inc. 927 s.
- Naylor, G. M. 1993. ODEON — Another hybrid room acoustic model. *Applied Acoustics*. vol. 38. s. 131-143.
- Proakis, J. G.; Manolakis, D. G. 1992. *Digital Signal Processing — Principles, Algorithms, and Applications*. 2. painos. New York. Macmillan Publishing Company. 969 s.
- Pulkki, V. 1997. Virtual sound source positioning using base amplitude panning. *Journal of the Audio Engineering Society*. vol. 45. nr. 6. June 1997. s. 456-466.
- Riederer, K. 1997. Head-Related Transfer Function Measurements. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi.
- Rocchesso, D.; Smith, J. O. 1997. Circulant and elliptic feedback delay networks for artificial reverberation. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. vol 5. nr. 1. January 1997. s. 51-63.
- Rossing, T. 1990. *The Science of Sound*. 2. painos. USA. Addison Wesley. 686 s.
- Samet, H. 1990. *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. USA. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 493 s.
- Sandvad, J. 1996. Dynamic aspects of auditory virtual environments. *An Audio Engineering Society Preprint 4226*. 100th Convention, 1996. May 11-14. Copenhagen.
- Savioja, L. 1995. Huoneakustiikan laskennallinen mallintaminen. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu. Tietotekniikan osasto. Tietojenkäsittelytekniikan laitos. Otaniemi. 93 s.
- Savioja, L.; Karjalainen, M.; Takala, T. 1996. DSP formulation of a finite difference method for room acoustics simulation. *IEEE Nordic Signal Processing Symposium*. Espoo. Finland. September 24-27. s. 455-458.
- Savioja, L. 1997a. Keskustelut tekn. lis. Lauri Saviojan kanssa keväällä ja kesällä 1997.
- Savioja, L.; Huopaniemi, J.; Lokki, T.; Väänänen, R. 1997b. Virtual environment simulation — Advances in DIVA project. *The Proceedings of ICAD'97, the International Conference on Auditory Display*. Palo Alto. California. USA. November 3-5. s. 43-46.
- Schoenle, M.; Fliege, N. J.; Zoelzer, U. 1993. Parametric approximation of room impulse responses by multirate systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. vol. I. Minneapolis. s. 153-156.
- Schroeder, M. R. 1962. Natural sounding artificial reverberation. *Journal of the Audio Engineering Society*. vol. 10. nr. 3. July 1962. s. 219-223.

- Shinn-Cunningham, B.; Lehnert, H.; Kramer, G.; Wenzel, E.; Durlach, N. 1997. Auditory displays. Chapter 29. In: Gilkey, R. H.; Anderson, T. R. (eds.) 1997. Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments. New Jersey. Lawrence Erlbaum Associates. Mahwah. 795 s.
- Spatialisateur. 1997. Le Spatialisateur. Ircam. Pariisi. Ranska. <URL: <http://www.ircam.fr/produits-real/logiciels/spat-e.html>>
- Stroustrup, S. 1992. The C++ Programming Language. 2. painos. Addison-Wesley Publishing Company. 669 s.
- Takagi, K. 1990. Some remarks on practical methods for calculating acoustical diffraction. Applied Acoustics. vol. 31. s. 119-132.
- Takala, T. 1989. Tietokonegrafiikka, opetusmonisteet. Teknillinen korkeakoulu. Otakustantamo. Espoo.
- Takala, T.; Hänninen, R.; Välimäki, V.; Savioja, L.; Huopaniemi, J.; Huottilainen, T.; Karjalainen, M. 1996. An integrated system for virtual audio reality. An Audio Engineering Society Preprint 4229 (M-4). 100th Convention, 1996. May 11-14. Copenhagen.
- Uosukainen, S. 1996. Akustinen kenttäteoria, opetusmonisteet. Teknillinen korkeakoulu. Otatiето Oy. Espoo.
- Van Maercke, D. 1986. Simulation of sound fields in time and frequency domain using a geometrical model. Proceedings of the 12th I.C.A., Toronto, Canada, July 1986, E11-7.
- Vian, J.-P.; Martin, J. 1992. Binaural room acoustics simulation: Practical uses and applications. Applied Acoustics. vol. 36. s. 293-305.
- Vorländer, M. 1989. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. Journal of Acoustical Society of America. vol. 86. nr. 1. July 1989. s. 172-178.
- Väänänen, R. 1997a. Simulation of Room Impulse Response. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio. Otaniemi. 89 s.
- Väänänen, R.; Välimäki, V.; Huopaniemi, J.; Karjalainen, M. 1997b. Efficient and parametric reverberator for room acoustics modeling. The Proceedings of ICMC'97. Thessaloniki. Greece. September 25-30. s. 200-203.
- Wenzel, E. M. 1994. Spatial sound and sonification. The Proceedings of ICAD'92, the International Conference on Auditory Display. Edited by Gregory Kramer. Proceedings vol XVIII. 1994. s. 127-150.
- Wenzel, E. M. 1996. What perception implies about implementation of interactive virtual acoustic environments. An Audio Engineering Society Preprint 4353 (H-2). 101th Convention, 1996. November 8-11. Los Angeles, California.

- Wenzel, E. M. 1997. Analysis of the role of update rate and system latency in interactive virtual acoustic environments. An Audio Engineering Society Preprint 4633 (J2). 103th Convention, 1997. September 26-29. New York.
- Xiang, N.; Blauert, J. 1993. Binaural scale modelling for auralisation and prediction of acoustics in auditoria. Applied Acoustics. vol. 38. Special Issue on Computer Modelling and Auralisation of Sound Fields in Rooms. s. 267-290.