

# KITARAEFEKTEJÄ KAIKUKOPPAMALLEILLA

**Henri Penttinen<sup>1</sup>, Vesa Välimäki<sup>1,2</sup> ja Matti Karjalainen<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio  
PL 3000, 02015 TKK, Espoo  
Henri.Penttinen@hut.fi

<sup>2</sup> Porin korkeakouluyksikkö  
PL 300, 28101 Pori

## 1 JOHDANTO

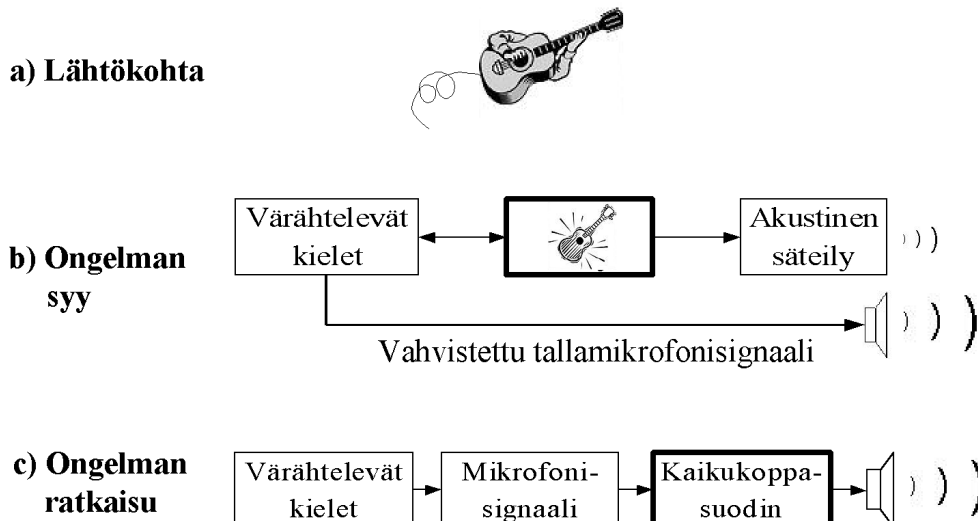
Musiikki- ja elokuvateollisuudessa käytetään runsaasti efektejä muuttamaan käytetyn äänimateriaalin äänenväriä ja lisäämään elävyyttä. Radiossa, levyillä ja mainoksissa soitetaan päivittäin prosessoitua ääntä. Yleisimpiä ääniefektejä ovat erilaiset kaiut ja äänen dynamiikkaa muuttavat kompressorit sekä limiterit. Kitaran tapauksessa suosittuja efektejä ovat edellä mainittujen lisäksi chorus, flanger, phaser ja särkijä. Tässä artikkelissa esittelemme uusia kitarafefektejä, jotka perustuvat kaikukopan mallintamiseen. Aluksi esittelemme tutkimuksen lähtökohdat ja syyt kaikukoppamallien kehitystarpeelle. Käsitlemme mittausjärjestelyitä ja suodinsuunnittelua kaikukoppamallien osalta. Lopuksi kuvaamme kitarafektien sovelluksia ja esitämme yhteenvedon.

## 2 KAIKUKOPPAMALLINTAMINEN

Akustisen kitaran tai muun kielisoittimen laadukas vahvistaminen on konserttitilanteessa usein ongelmallista. Akustisen kitaran tapauksessa vahvistettu ääni saattaa kuulostaa kuivalta ja muistuttaa soinniltaan sähkökitaraa. Tällöin visuaalinen ja kuultu informaatio ovat hieman ristiriidassa keskenään, koska nähdään akustisen kitaran soittaja, mutta kuullaan suhteellisen sähköinen sointi. Ristiriidan syy on tyypillisesti mikrofonijärjestelmässä.

Yksi mahdollisuus akustisen kitaran vahvistamiseen on käyttää soittimen ulkopuolisia mikrofoneja, jolloin saavutetaan luonnollinen äänenväri. Järjestely on ongelmallinen, koska ulkopuolisen mikrofonin käyttö sitoo soittajan paikoilleen. Myös akustinen kierto saattaa muodostua häiritseväksi ja muiden soittimen tuottamat äänet sekä soittajan liikehdintä saattavat kuulua vahvistetussa signaalissa. Näistä syistä käytetään usein soittimen kaikukopan sisälle tai tallan alle kiinnitettävää mikrofonia (ks. kuva 1a).

Kitarassa tällä sijaitsee kaikukopan kannessa kielien päässä. Sisäistä mikrofonia käytettäessä soittajan ei tarvitse pysyä paikallaan, kierto-ongelmat vähenevät ja muut ulkopuoliset äänet eivät kuulu vahvistetussa signaalissa. Toisaalta tällaisen mikrofonin tuottama ääni on soittimen akustisesti säteilemään äänen verrattuna luonnoton ja kuiva. On myös kondensaattorimikrofoneja, jotka asetetaan soittimen kaikukopan suulle, jolloin vahvistettava ääni on hieman luonnollisempi kuin edellisessä tapauksessa. Toisaalta kaikukopan suulla sijaitseva mikrofoni korostaa helposti kaikukopan ilmaresonansseja, mutta ei reagoi yhtä herkästi kaikukopan kannen värähtelyihin. Joissain mikrofonijärjestelmissä yhdistetään kaikukopan suulle asetetun ja sisäisen mikrofonin signaalit, jolloin voidaan säädellä signaalien suhdetta halutulla tavalla.



Kuva 1. Tallamikrofonilla varustetun akustisen kitaran laadukas ja luonnollisen kuuloinen vahvistaminen konserttitilanteessa: a) lähtökohta, b) ongelman syy ja c) ongelman ratkaisu.

Tallan alle tai kaikukopan sisään sijoitetun mikrofonin etu on se, että soittaja pystyy liikkumaan vapaammin, kun taas haittapuoli on ettei äänenväri ei ole täysin luonnollinen. Syy äänenvärin kuivuuteen on se, että tallamikrofoni ei reagoi kaikkiin kaikukopan värähtelyihin. Ero on selvä luonnolliseen akustiseen kitaransoittoon verrattuna, jossa kaikukoppa vahvistaa ja värittää kitaran kielten synnyttämää ääntä. Kuvassa 1b havainnollistetaan miten akustisen kitaran ääni syntyy kaikukopan avulla, kun taas vahvistettu tallamikrofonisignaali 'ohittaa' kaikukopan ja sen vaikutukset.

Tutkimusten tuloksena on kehitetty reaaliaikainen digitaalinen signaalinkäsittelysovellus, jolla voidaan simuloida akustisen kitaran kaikukoppaa [1-3]. Kaikukoppaa mallintavan suotimen avulla (ks. kuva 1c) tallamikrofonisignaali saadaan kuulostamaan rikkaammalta ja luonnollisemmalta käsittelemättömään mikrofoni-signaaliin verrattuna. Tämän tyyppinen simulointi on mahdollista, koska siirtofunktiota kielen värähtelystä tallan kautta akustiseen säteilyyn voidaan pitää lineaarisena ja aikainvarianttina [4-7]. Kuva 1c esittää signaalitiet korjatussa tapauksessa, kun digitaalinen suodin asennetaan sarjaan mikrofonin ja kaiuttimen väliin.

### 3 MITTAUSJÄRJESTELYT

Kaikukopan realistisen mallintaminen edellyttää todellisen kaikukopan käyttäytymisen mittaamista. Mittaukset suoritettiin kaiuttomassa huoneessa, jotta huoneen vaikutukset olisivat mahdollisimman pienet. Akustisen kitaran soittajan eteen asetettiin mittamikrofoni noin 1 m etäisyydelle. Tällä mikrofonilla saatu digitaalisesti äänitetty signaali,  $p(n)$ , vastaa tavoitesignaalia, jossa kuuluu kielten värähtelyn lisäksi kopan vaikutus. Samanaikaisesti äänitettiin tallamikrofonilla toinen signaali,  $x(n)$ , joka on korjattava kuiva signaali. Kaikukoppaa simuloivan korjaussuotimen impulssivaste,  $h_{eq}$ , voidaan laskea näistä signaaleista dekonvoluutiolla, joka vastaa signaalien spektrien jakolaskua:

$$h_{eq}(n) = \text{FFT}^{-1} \left( \frac{\text{FFT}\{p(n)\}}{\text{FFT}\{x(n)\}} \right), \quad (1)$$

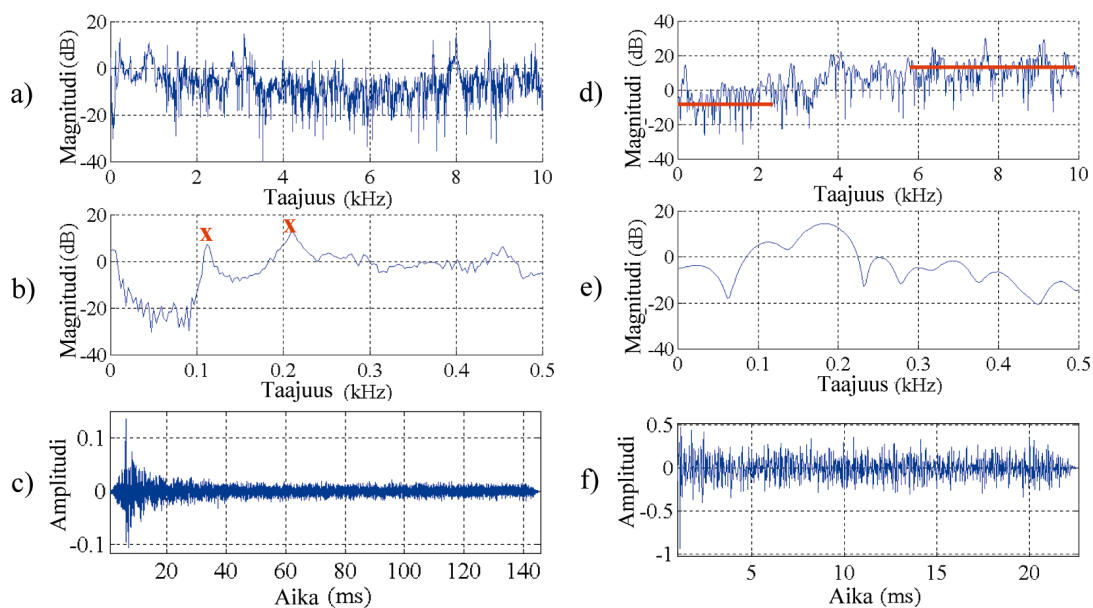
missä  $p(n)$  on kitaran muodostama akustinen säteily mittauspisteessä,  $x(n)$  on tallamikrofonilla taltioitu signaali,  $n$  on diskreetti aikamuuttuja, FFT on nopea Fourier-muunnos (engl. Fast Fourier Transform) ja  $\text{FFT}^{-1}$  on käänteinen FFT. Paras lopputulos saavutettiin, kun herätesignaali oli normaalia kitaran soittoa. Samaa mittausjärjestelyä ja periaatetta voidaan käyttää muillekin kielisoittimille. Akustisen kitaran tapauksessa mittauksissa käytettiin sekä teräsettä nylonkielistä kitaraa.

Kun sähkökitara halutaan saada kuulostamaan akustiselta kitaralta, mikrofonit täytyy muuttaa. Tällöin teräskielisen akustisen kitaran kaikukopan suuaukolle (kielten alle) asetetaan magneettimikrofoni, samanlainen jota käytetään sähkökitaroissa. Teräskielten värähdellessä magneettimikrofoniin indusoituu virta, joka vastaa kaavan (1) signaalia  $x(n)$ . Magneettimikrofoni toimii alipäästösuotimena [8], jonka vaikutus kumoutuu koppasuotimessa sen ylipäästöluonteen ansiosta. Magneettimikrofonia lukuun ottamatta mittausjärjestelyt ovat samat kuin edellä. Vaihtoehtoisesti sähkökitaralle voidaan määrittää koppaa simuloiva suodin impulssivasaralla mitatusta vasteesta. Tällöin mitataan kaiuttomassa huoneessa kitaran impulssivaste, joka saadaan lyömällä tallaa kevyellä impulssivasaralla. Mitattu impulssivaste ylipäästösuodatetaan, jotta magneettimikrofonin alipäästöluonne saadaan kompensoitua.

## 4 KAIKUKOPPASUODINSUUNNITTELU

### 4.1 FIR- ja IIR-koppasuotimet

Yksinkertainen, mutta laskennallisesti raskain, tapa toteuttaa koppaa simuloiva suodin on FIR-suodin. FIR-suotimella on saatu parhaalta kuulostavat tulokset. Noin 1000-4000 kertaluvun FIR-suodin on riittävän hyvä. Suodin muodostetaan ikkunoimalla impulssivaste  $h_{eq}$  sopivalla tavalla. Vaihtoehtoisesti voidaan suunnitella rekursiivinen eli IIR-suodin vasteesta  $h_{eq}$  käyttämällä esimerkiksi lineaariprediktiota tai Pronyn menetelmää. Näillä suodinsuunnittelumenetelmillä tulokset eivät ole yhtä hyviä kuin FIR-suotimella, vaikka IIR-suotimen asteluku olisi erittäin suuri. Kuvassa 2 esitetään koppasuotimien magnitudi- ja aikavasteet sekä teräskieliselle akustiselle kitaralle että sähkökitaralle. Kuvassa 2a näytetään akustiselle kitaralle tarkoi-



Kuva 2. Koppasuotimen magnitudi- ja aikavaste a)-c) akustiselle ja d)-f) sähkökitaralle.

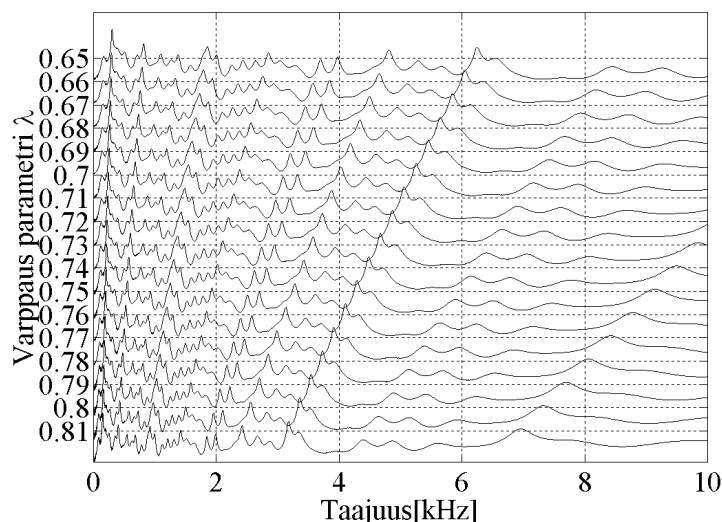
tetun koppasuotimen magnitudivaste 10 kHz:iin asti. Kuva 2b esittää saman vasteen pienillä taajuuksilla, missä havaitaan kaksi voimakasta resonanssia (merkitty rasteilla kuvassa 2b). Tyypillisesti nämä kauan soivat resonanssit ovat taajuusalueella 80-250 Hz riippuen käänteisesti kopan koosta eli suurella kopalla taajuudet ovat pienempiä kuin pienemmällä kopalla. Suuremmilla taajuuksilla resonanssitiheys kasvaa, kuten huonevasteissa.

Aikavasteesta (kuva 2c) nähdään, miten kohinainen suotimen impulssivaste on. Tästä syystä liian pitkän suotimen (yli n. 6000 kerrointa) vasteessa voidaan kuulla ylimääräistä kaiuntaa. Sähkökitaralle tarkoitetun koppasuotimen vastaavat vasteet näytetään kuvissa 2d-f. Kuvasta 2d nähdään koppasuotimen ylipäästöluonne, jolla kumotaan magneettimikrofonin alipäästö-ominaisuus. Ominaisuutta on havainnollistettu ylimääräisillä viivoilla pienillä ja suurilla taajuuksilla. Sähkökitaralle tarkoitetun suotimen asteluku on alle 1000, jotta suodatetussa vasteessa ei kuuluisi ylimääräistä kaiuntaa.

Molemmille kitaroille tarkoitetuista FIR-suotimista voidaan poistaa alimmat resonanssit ja korvata ne säädettävillä toisen kertaluvun resonaattoreilla. Tällöin FIR-vastetta voidaan lyhentää, jolloin säästetään laskentatehoa. Lisäksi säädettävien resonaattoreiden taajuutta, amplitudia ja kaistanleveyttä voidaan muuttaa, minkä ansiosta saavutetaan parempi hallittavuus.

## 4.2 Varpatut koppasuotimet

Linearisessa suotimessa kaikki taajuudet kuvataan yhtä tarkasti, kun taas varpatuissa suotimissa [9-11] on mahdollista muuttaa suotimen taajuusresoluutiota. Tämän ominaisuuden ansiosta varpatuilla suotimilla voidaan mallintaa kuulojärjestelmän taajuusresoluutiota [11]. Kuulon kannalta on hyödyllistä käyttää varpattuja suotimia kitaran kaikukoppaa mallinnettaessa [7]. Yksi varpattujen suotimien ominaisuus, joka on kitaraeftien kannalta erittäin hyödyllinen, on se että varpatun suotimen taajuusvastetta voidaan venyttää tai supistaa yhdellä parametrilla, varppauskertoimella  $\lambda$ . Jotta varpattu suodin pysyy stabiilina, parametrin  $\lambda$  arvo on valittava väliltä  $[-1, 1]$ . Kuvassa 3 esitetään koppasuotimen magnitudivasteita  $\lambda$ :n arvoilla 0.65-0.81 (0.01:n askelissa). Alkuperäisen koppamallin varpatussa suodinmallissa  $\lambda =$



Kuva 3. Varpatun koppasuotimen magnitudivaste eri varppauskertoimen  $\lambda$  arvoilla. Y-akseli kuvaa pinottujen magnitudivasteiden  $\lambda$ :n arvoa ja x-akseli taajuutta. Alkuperäinen koppavaste sijaitsee magnitudivasteiden keskellä ( $\lambda = 0.73$ ).

0.73. Tällä  $\lambda$ :n arvolla varpatun suodinmallin resonanssitaajuudet ovat samat kuin tavallisen varppaamattoman koppamallin. Kuvasta 3 nähdään miten  $\lambda$ :n arvoa suurentamalla ( $0.73 < \lambda \leq 1$ ) resonanssit siirtyvät kohti pieniä taajuuksia ja vastaavasti pienentämällä ( $-1 \leq \lambda < 0.73$ ) kohti suuria taajuuksia.

## 5 EFEKTIEN SOVELLUKSIA

Edellä esitellyillä koppaa simuloivilla suotimilla käsitellään kitaran soittoa. Huolimatta FIR-toteutuksen korkeasta asteluvusta suodattaminen on mahdollista toteuttaa reaaliajassa signaaliprosessorilla eli kitaramikrofonin vaste voidaan korjata konserttitilanteessa.

### 5.1 Akustisen kitaran kaikukopan simuloiminen

Akustinen kitara kuulostaa konserttitilanteessa kuivalta ja sähkökitaramaiselta tallamikrofoneja käytettäessä, koska tallamikrofoni ei havaitse soittimen kaikukoppaa. Tällöin on perusteltua käyttää kaikukoppasuodinta, jonka avulla akustinen kitara saadaan kuulostamaan akustisemmalta. Lisäksi sähkökitara saadaan kuulostamaan lähes akustiselta kitaralta käyttämällä sopivaa koppasuodinta [2,3]. Yksi ongelma on se, että magneettimikrofoni vaimentaa suuria taajuuksia ja sähkökitaralle tarkoitettu koppasuodin korostaa niitä (ks. kuva 2d), jolloin signaali-kohinasuhde suurilla taajuuksilla voi muodostua huonoksi ja kohina voi tulla häiritseväksi. Tämä huomataan helposti, kun soitto on hiljaista tai loppuu kokonaan. Siitä huolimatta efekti toimii vakuuttavasti varsinkin kun ennen tai jälkeen hempeää näppäilyosuutta käytetään sähkökitaralle tyypillistä särkijää. Koska sähkökitaralle on olemassa kaksi tapaa laskea kaikukoppaa simuloiva suodin, kuten aiemmin esiteltiin, voidaan helposti muodostaa stereoeffekti. Tällöin magneettimikrofonisignaali suodatetaan kahdella eri suotimella ja vasteet panoroidaan stereokuvassa hieman vasemmalla ja oikealle. Toisaalta liioiteltu panorointi ei ainakaan kuulokekuuntelussa kuulosta hyvältä. Lisäksi molemmille kitaroille voidaan muodostaa stereoeffekti käyttämällä kahden *erikokoisen* kitaran koppavasteita ja panoroimalla ne pois keskeltä.

### 5.2 Havaitun koppakoon muuttaminen

Varpatulla suodinrakenteella voidaan siirtää resonanssien taajuuksia muuttamalla varppausparametrin  $\lambda$  arvoa. Kuuntelukokeissa on todettu, että  $\lambda$ :n arvoa säätämällä pienikokoinen koppamalli voidaan muuttaa suurikokoiseksi ja päinvastoin [12]. Koska kaikukoppamallin pientaajuiset resonanssit riippuvat kaikukopan koosta, on ymmärrettävää että  $\lambda$ :aa muuttamalla näin tapahtuu. Varpatun koppamallin suurtaajuiset resonanssit vaikuttavat myös havaittuun kokoon. Niiden muuttuminen sekoittaa hieman havaitun koppakoon määrittämistä, mutta koska pientaajuiset resonanssit dominoivat koon arvioimista, koon muuttaminen on mahdollista koppamallin kaikkia resonansseja siirtämällä. Musiikillisesti ajateltuna tätä efektiä voidaan käyttää kahdella eri tavalla: 1) askelittain, jolloin  $\lambda$ :n arvoa muutetaan tietyin, musiikillisesti merkittävin väliajoin; 2) jatkuvasti, jolloin on vaikeata (lähes mahdotonta) tulkita efektiä kopan kokoa muuttavana, ja tällöin tulos ennemminkin värittää vastetta ja muistuttaa phaser-efektiä. Reaaliaikaisessa toteutuksessa on kätevää hallita  $\lambda$ :n arvoa polkimella. Kopan koon muuttamiseksi voidaan käyttää sekä akustiselle että sähkökitaralle.

## 6 YHTEENVETO

Akustisen kitaran kuivalta ja elottomalta kuulostavaa tallamikrofonisignaalia saadaan parannettua digitaalisuotimilla, jolloin havaittu vaste kuulostaa enemmän akustiselta kitaralta kuin käsittelemätön signaali. Menetelmää voidaan soveltaa myös sähkökitaraan, jonka ansiosta sähkökitara saadaan kuulostamaan lähes akustiselta kitaralta. Näihin kaikukoppamalleihin voidaan soveltaa varpattuja suodinrakenteita, joiden avulla havaittua kitaran kaikukopan ko-koa voidaan muuttaa tai käyttää ajassa muuttuvasti vastetta värittäväenä efektinä.

Akustisen kitaran tapauksessa koppasuodin lisää kiertoherkkyyttä, koska se vahvistaa voimakkaasti muutamia pientaajuisia resonansseja. Tilannetta voidaan korjata kapealla kais-  
tanestosuotimella, joka vaimentaa resonansseja, mutta tällöin ammutaan omaan nilkkaan, koska ainakin osittain kumotaan jo saavutettu haluttu parannus. Tästä mahdollisesta haitta-  
puolesta huolimatta esitellyt kitaraefektit voivat olla käyttökelpoinen lisä jokaisen aikaansa seuraavan kitaristin efektiarsenaaliin.

### KIITOKSET

Tämän tutkimuksen ovat rahoittaneet Suomen Akatemia ja TEKES.

### LÄHTEET

1. KARJALAINEN M, VÄLIMÄKI V, PENTTINEN H & SAASTAMOINEN H, DSP equalization of electret film pickup for the acoustic guitar. *J Audio Eng Soc* **48**(2000)12, 1183-1193.
2. KARJALAINEN M, PENTTINEN H & VÄLIMÄKI V, Acoustic sound from the electric guitar using DSP techniques. *Proc IEEE ICASSP'2000*, Istanbul, Turkki, vol 2, 773-776.
3. PENTTINEN H, VÄLIMÄKI V & KARJALAINEN M, A digital filtering approach to obtain a more acoustic timbre for an electric guitar. *Proc EUSIPCO 2000*, vol 4, 4.-8.9.2000, Tampere, 2233-2236.
4. MATHEWS M & KOHUT J, Electronic simulation of violin resonances. *J Acoust Soc Am* **53**(1973)6, 1620-1626.
5. SMITH J O, *Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin*. Väitöskirja, CCRMA, Dept. of Music, Stanford University, Stanford, CA, Report STAN-M-14, 1983.
6. KARJALAINEN M. & SMITH J O, Body modeling techniques for string instrument synthesis. *Proc Int Computer Music Conf*, 19.-24.8.1996, Hongkong, 232-239.
7. KARJALAINEN M, Warped filter design for the body modeling and sound synthesis of string instruments. *Proc Nordic Acoustical Meeting*, 12.-14.6.1996, Helsinki, 445-453.
8. JUNGSMANN T, *Theoretical and Practical Studies on the Behaviour of Electric Guitar Pickups*. Diplomityö, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, TKK, Espoo 1994.
9. SCHÜSSLER W & WINLENKEMPER W, Variable digital filters. *Arch Elek Übertragung* **24**(1970), 524-525.
10. STRUBE H W, Linear prediction on a warped frequency scale. *J Acoust Soc Am* **68**(1980) 4, 1071-1076.
11. HÄRMÄ A, KARJALAINEN M, SAVIOJA L, VÄLIMÄKI V, LAINE U K & HUOPANIEMI J, Frequency-warped signal processing for audio applications. *J Audio Eng Soc* **48**(2000)11, 1011-1031.
12. PENTTINEN H, HÄRMÄ A & KARJALAINEN M, Digital guitar body mode modulation with one driving parameter. *Proc COST-G6 Conf Digital Audio Effects (DAFx'00)*, 7.-9.12.2000, Verona, Italia, 31-36.