

VIRTUAALIANALOGIASYNTEESIN LYHYT HISTORIA

Jussi Pekonen, Vesa Välimäki

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu
PL 13000, 00076 AALTO
Jussi.Pekonen@aalto.fi, Vesa.Valimaki@tkk.fi

1 JOHDANTO

Suurin osa 1960- ja 1970-lukujen analogielektroniikkaan perustuvista musiikkisyntetisaattoreista käytti äänentuottomenetelmänään vähentävää synteesiä. Vähentävässä synteesissä generoidaan aluksi spektriltään rikas lähdesignaali, jota suodatetaan aikamuuttuvalla suodattimella. Tyypillisesti lähdesignaalina käytettiin yhtä klassisista geometrisista aaltomuodoista, joita ovat saha-, pulssi- ja kolmioaalto. Toisinaan käytettiin myös näiden aaltomuotojen yhdistelmää tai kohinaa. Suodatus tehtiin tyypillisesti alipäästösuodattimella, jolla on säädettävä resonanssi kulmataajuuden läheisyydessä.

1980- ja 1990-luvuilla vähentävä synteesi jäi taka-alalle suosituimpana äänentuottomenetelmänä taajuusmodulaatio- ja nämplyssynteesien kasvattaessa suosiotaan. Samaan aikaan digitaalista signaalinkäsittelyä hyödynnettiin enenevässä määrin myös musiikkisyntetisaattoreissa. Tästä johtuen vaikutti siltä, että vähentävästä synteesistä olisi tullut äänentuottomenetelmänä harvinainen. Kuitenkin 1990-luvun puolivälissä muusikot alkoivat kiinnostua uudelleen vähentävän synteesin ”lämpimästä” äänensävyistä.

Vastatakseen muusikoiden vähentävään synteesiin kohdistuneeseen kysyntään ruotsalainen yhtiö Clavia julkaisi vuonna 1995 NordLead-syntetisaattorin, joka käytti vähentävää synteesiä äänentuottomenetelmänään mutta käyttäen digitaalisen signaalinkäsittelyn keinoja. NordLead-syntetisaattori oli ensimmäinen digitaalinen syntetisaattori, joka mallinsi analogisten syntetisaattoreiden äänentuottomenetelmää [1, 2], vaikkakin joitain analogisyntetisaattoreiden ominaisuuksia oli mallinnettu aiemmin Rolandin syntetisaattoreissa. Digitaalista signaalinkäsittelyä käyttäen analogisyntetisaattoreiden ongelmat voitiin välttää. Siinä missä analogiset syntetisaattorit olivat aika kookkaita ja niissä oli lämpötilariippuvia viritysongelmia, digitaaliset syntetisaattorit pysyvät aina vireessä ja ne voidaan rakentaa pienempään kokoon.

Yhdessä NordLead-syntetisaattorin julkistuksen kanssa Clavia lanseerasi termin ”virtuaalianalogia”, joka tarkoittaa analogisten äänilaitteiden digitaalista mallintamista [1, 2]. Tästä lähtien tutkimus digitaalisten signaalinkäsittelymenetelmien käytöstä vähentävässä äänisynteesissä on kasvattanut kiinnostusta sekä akateemisessa maailmassa että musiikkiteknologia-yhtiöissä, kuten Yamahalla, Korgilla, Rolandilla, Native Instrumentilla, Accessilla ja Arturiolla, ja kiinnostus on kasvanut yhä enenevässä määrin viimeisinä muutamina vuosina.

Tässä artikkelissa käydään läpi virtuaalianalogiasynteesin tutkimuksen julkaisuhistoriaa. Luvussa 2 esitetään virtuaalianalogiasynteesiin liittyvien julkaisujen määrä eri vuosina ja tarkastellaan tutkimuksen historiallista kehittymistä. Lisäksi analysoidaan virtu-

aalianalogiasynteesiin liittyvien julkaisujen tyyppinä. Julkaisuissa käytettyjä menetelmiä tarkastellaan lyhyesti luvussa 3 ja luvussa 4 kuvataan virtuaalianalogiasynteesin tutkimuksen nykytrendiä sekä pohditaan tutkimuksen tulevaisuuden näkymiä. Luku 5 päättää artikkelin.

2 VIRTUAALIANALOGIASYNTESISIN LIITTYVÄT JULKAISUT

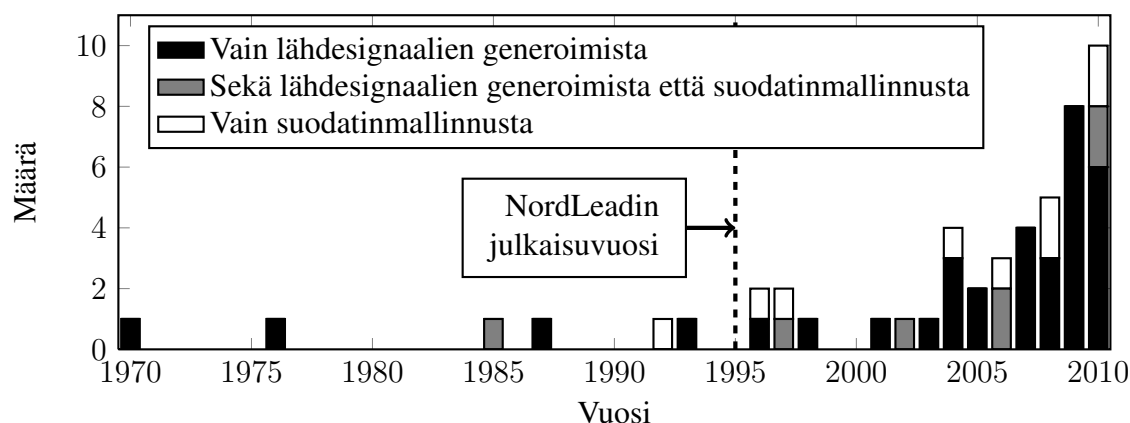
Virtuaalianalogiasynteesin tutkimus on lisääntynyt viime vuosina huomattavasti. Tämä voidaan nähdä kuvasta 1, missä on annettuna julkaisumäärät eri vuosina. Julkaisut, jotka käsittelevät vain lähdesignaalien generoimista ovat merkitty mustalla, kun taas vain suodatinmallinnukseen keskittyvät julkaisut ovat merkitty valkoisella. Julkaisut, jotka ovat merkitty harmaalla, käsittelevät sekä lähdesignaalien generoimista että suodatinmallinnusta. Kuvan 1 katkoviiva osoittaa NordLead-syntetisaattorin julkaisuvuoden.

Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, on tämän aiheen tutkimus kasvanut merkittävästi viime vuosien aikana. Viime vuonna (2010) julkaistiin ennätyskymmenen virtuaalianalogiasynteesiin liittyvää julkaisua, mikä on viidesosa aihepiirin julkaisujen kokonaismäärästä. Eri vuosien osuutta julkaisujen kokonaismäärään on tarkasteltu tarkemmin taulukossa 1, missä prosenttiosuuksien lisäksi on esitetty käänteiset kumulatiiviset osuudet. Käänteiset kumulatiiviset osuudet osoittavat, kuinka pääosa aiheen tutkimuksesta on tehty viime vuosina. Noin puolet julkaisuista on julkaistu viimeisten kolmen vuoden aikana, noin kaksi kolmasosaa vuoden 2005 jälkeen ja noin 80 % viime vuosikymmenen aikana.

Kuvasta 1 ja taulukosta 1 nähdään myös, että kuusi virtuaalianalogiasynteesiin liittyvää julkaisua on julkaistu ennen NordLead-syntetisaattorin julkistusta (1995). Nämä julkaisut esittelevät itse asiassa digitaalisen vähentävän synteesin kokeiluissa kehitettyjä menetelmiä. Lisäksi kuva 1 osoittaa, että julkaisuista suurempi osa keskittyy lähdesignaalien generoimiseen kuin suodatinmallinnukseen. Tämä johtuu siitä tosiasiasta, että perinteisesti käytetyt aaltomuodot sisältävät aaltomuodon tai sen derivaatan epäjatkuvuuksien aiheuttamaa häiritsevää laskostumista, kun ne generoidaan digitaalisesti.

Vuoteen 2010 mennessä 34 julkaisua on keskittynyt vain lähdesignaalien laskostumisoongelmaan, kun taas yhdeksän julkaisua käsittelee vain suodatinmallinnusta. Seitsemän julkaisua käsittelee sekä lähdesignaalien generoimista että suodatinmallinnusta. Tämä tarkoittaa, että 82 % virtuaalianalogiasynteesiin liittyvistä julkaisuista käsittelee klassisten geometrinen aaltomuotojen digitaalista generoimista.

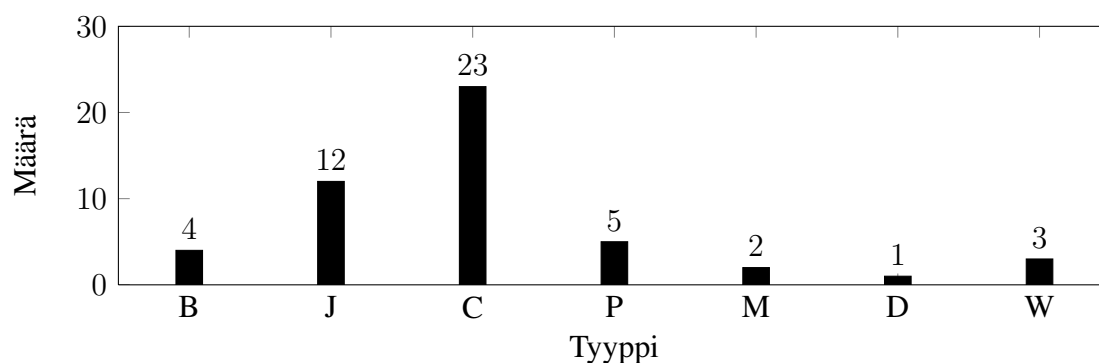
Virtuaalianalogiasynteesiin liittyvien julkaisujen julkaisutyyppien määrä on listattu kuvassa 2. Julkaisuista neljä on julkaistu osana kirjaa (kirjan kappale), 12 lehtiartikkelina ja 23 konferenssiartikkelina. Lisäksi aiheesta on käsitelty viidessä patentissa, kahdessa maisterityössä (diplomitoita), sekä yhdessä väitöskirjassa. Näiden lisäksi on vielä kolme (julkaisematonta) verkkojulkaisua.



Kuva 1: Virtuaalianalogiasynteesiin liittyvien julkaisujen määrä eri vuosina. Lähdesignaalien generoimiseen keskittyvät julkaisut ovat merkitty mustalla ja suodatinmallinnukseen keskittyvät julkaisut ovat merkitty valkoisella. Sekä lähdesignaalien generoimista että suodatinmallinnusta käsittelevät julkaisut ovat merkitty harmaalla. Katkoviiva osoittaa NordLead-syntetisaattorin julkaisuvuoden.

Taulukko 1: Eri vuosien julkaisujen osuus julkaisujen kokonaismäärästä. Käänteinen kumulatiivinen osuus (taulukon rivit K. k.) osoittaa, kuinka pääosa tutkimuksesta on keskittynyt viime vuosille.

Vuosi	1970	1976	1985	1987	1992	1993	1996	1997	1998	2001
Määrä	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
%-osuus	2	2	2	2	2	2	4	4	2	2
K. k. (%)	100	98	96	94	92	90	88	84	82	80
Vuosi	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Yht.
Määrä	1	1	4	2	3	4	5	8	10	50
%-osuus	2	2	8	4	6	8	10	16	20	100
K. k. (%)	78	76	68	64	60	54	46	36	20	



Kuva 2: Virtuaalianalogiasynteesiin liittyvien julkaisujen julkaisutyypit: B tarkoittaa kirjan kappaleita, J lehtiartikkeleja, C konferenssiartikkeleja, P patenteja, M maistereitöitä, D väitöskirjoja, ja W (julkaisemattomia) verkkojulkaisuja.

3 VIRTUAALIANALOGIASYNTTEESIN MENETELMÄT

Lähdesignaalien generoiminen ja suodatinmallinnus ovat eriytyneet erillisiksi tutkimusaiheiksi. Näin ollen näissä tutkimusaiheissa on käytetty toisistaan eroavia menetelmiä. Lähdesignaalien generoimista käsittelevien julkaisujen menetelmät voidaan jakaa karkeasti neljään kategoriaan:

1. ideaalisesti laskostumattomiin,
2. melkein laskostumattomiin,
3. laskostumista vaimentaviin, sekä
4. ad-hoc-algoritmeihin.

Ideaalisesti laskostumattomat lähdesignaali-algoritmit generoivat vain halutun määrän harmonisia komponentteja. Käytännössä nämä komponentit generoidaan kuuloalueelle digitaalisen järjestelmän Nyquist-taajuuden alapuolelle. Melkein laskostumattomat algoritmit sallivat jonkin verran laskostumista pääosin korkeilla taajuuksilla, missä ihmisen kuulo on epätarkempi kuin matalilla ja keskitaajuuksilla. Tämä kategorian algoritmit generoivat käytännössä alipäästösuodatettua impulssijonoa tai askelfunktiotekniikkaa, joista molemmista voidaan muodostaa klassisia aaltomuotoja.

Laskostumista vaimentavien algoritmien voidaan ajatella näytteistävän signaalia, jolla on sama spektrisisältö kuin kohteena olevalla aaltomuodolla, mutta jolla on jyrkempi spektrin vaimeneminen kuin kohdeaalto-odolla. Tällä tavoin näytteistetty signaali sisältää laskostumista koko kuuloalueella, mutta tavoitesignaaliin verrattuna vaimennettuna. Näytteistetyksen jälkeen haluttujen harmonisten komponenttien tasot korjataan digitaalisella ylipäästösuodattimella. Ad-hoc-algoritmeihin lukeutuu moninaisia menetelmiä, jotka generoivat klassisia aaltomuotoja muistuttavia signaaleja, mutta jotka eivät välttämättä ole laskostumattomia. Itse asiassa monissa tämä kategorian algoritmeissa tavoitteena on generoida haluttu aaltomuoto käyttäen yksinkertaisia digitaalisen signaalinkäsittelyn menetelmiä.

Aaltomuotojen generoimiseen keskittyvien julkaisujen lisäksi yhdessä julkaisussa selitetään, kuinka muut aaltomuodot voidaan saada saha-aallosta suodattamalla sitä digitaalisella kampsuodattimella. Lisäksi yhdessä julkaisussa kuvataan digitaalinen malli astabiilille analogiselle multivibraattorille, jolla voidaan generoida jatkuva-aikaisia klassisia aaltomuotoja.

Siinä missä lähdesignaalien generoimiseen käytetyt algoritmit voidaan jakaa useampaan eri kategoriaan, suodatinmallinnuksen menetelmät ovat jaettavissa joko ns. mustan tai valkoisen laatikon mallinnusmenetelmiin. Mustan laatikon malleissa suodattimen tulo- ja lähtösignaalien suhde on mallinnuksen kohteena, kun taas valkoisen laatikon malleissa mallinnetaan signaalien etenemistä suodattimen sähköisessä piirissä. Kuitenkin yleensä suodatinmallinnukseen keskittyvien julkaisujen suurin ero on mallinnuksen kohteena olevan analogisyntetisaattorin suodatin. Todellisten analogisyntetisaattoreiden suodatinten lisäksi on kehitetty myös suoraan virtuaalianalogiasynteesin käyttöön suunniteltuja suodattimia.

Suosituille Robert Moogin suunnittelema jänniteohjatulle transistoripohjaiselle tika-puusuodattimelle on kehitetty sekä lineaarisia että epälineaarisia piirimalleja. Tälle suodattimelle on myös johdettu Volterra-sarjaan perustuvia signaalimalleja. Epälineaarisia piirimalleja on myös kehitetty diodipohjaiselle EMS VCS3 -suodattimelle sekä Korg MS-20 -analogisyntetisaattorin suodattimelle.

4 VIRTUAALIANALOGIASYNTTEESIN TUTKIMUKSEN NYKYTILA JA TULEVAISUUS

Virtuaalianalogiasynteesin tutkimuksen nykytila ja tulevaisuus näyttää tällä hetkellä valoisalta. Kirjoittajien tietämyksen mukaan vuonna 2011 on julkaistu kaksi lähdesignaalien generoimista käsittelevää lehtiartikkelia. Lisäksi kaksi muuta julkaisua on hyväksytty julkaistavaksi ja ne ovat tämän artikkelin kirjoitushetkellä painossa.

Useista lähdesignaalien generoimiseen liittyvistä julkaisuista huolimatta lähdesignaalien laskostuminen ei ole täysin ratkaistu ongelma. Yksikään olemassa olevista algoritmeista ei täytä optimaalisen lähdesignaali-algoritmin ominaisuuksista, joita ovat:

1. tuotetussa aaltomuodossa ei kuulla laskostumista musiikissa käytetyillä perustajuuksilla (noin 20 Hz:stä 8 kHz:iin),
2. algoritmi on laskennallisesti tehokas ja se vie vähän muistia, sekä
3. algoritmi ei vaadi jakolaskua aikamuuttuvalla parametrilla, esimerkiksi perustajuudella.

Joillakin olemassa olevilla algoritmeilla kaksi ensimmäistä ominaisuutta on tavoitettavissa, mutta nämä algoritmit eivät täytä kolmatta vaatimusta. Toisaalta jotkin algoritmit täyttävät kolmannen vaatimuksen, mutta näillä taas ensimmäinen tai toinen vaatimus ei täyty. Tämän vuoksi optimaalisen lähdesignaali-algoritmin kehittäminen tulee jatkossakin olemaan aktiivinen aihe virtuaalianalogiasynteesin tutkimuskentässä.

Optimaalisen algoritmin kehittämisen lisäksi lähdesignaali-tutkimuksessa on ryhdytty tutkimaan analogisyntetisaattoreiden lähdesignaalien tarkempaa mallinnusta. Analogisyntetisaattoreiden aaltomuodot eroavat geometrisista aaltomuodoista, jotka ovat olleet lähdesignaali-algoritmien mallinnuskohteena tähän saakka. Realistisen virtuaalianalogiasyntetisaattorin toteuttamiseksi nämä erot tulisi mallintaa. Lähitulevaisuudessa tämä tutkimussuunta näyttäisi kasvattavansa mielenkiintoa, kun erilaisia analogisyntetisaattoreita tullaan analysoimaan. Ja koska tämän tutkimussuunnan mallinnuskohde on samankaltainen suodatinmallinnuksen kanssa, tullaan suodatinmallinnuksessa käytettyjä menetelmiä (eli signaali- ja piirimalleja) soveltamaan myös lähdesignaali-tutkimuksessa.

Suodatinmallinnuksessa olemassa olevia suodatinmalleja tullaan varmasti tarkentamaan ja parantamaan. Yksi mahdollinen tarkennusmenetelmä voisi olla mallien laskennallisen kuorman optimointi ottamalla huomioon vain aistihavainnon kannalta olennaiset kohdesuodattimen ominaisuudet. Toisaalta mallinnettujen suodatinten valikoima tulee kasvamaan, ja erilaisia malleja näille uusille suodattimille tullaan kehittämään.

5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa käytiin läpi virtuaalianalogiasynteesin tutkimuksen historiaa. Artikkelissa osoitettiin, että viimeisten muutaman vuoden julkaisumäärien perusteella virtuaalianalogiasynteesin tutkimus on kasvanut huomattavasti. Noin puolet, kaksi kolmasosaa ja neljä viidesosaa julkaisuista on tuotettu viimeisten kolmen, viiden ja kymmenen vuoden aikana, vastaavasti. Viime vuonna, 2010, tuotettiin ennätykselliset kymmenen aiheeseen liittyvää julkaisua. Lisäksi artikkelissa osoitettiin, että yli 80 % aihepiirin julkaisuista käsittelee lähdesignaalien generoimista, aihetta, jota on oikeutetusti tutkittu perinteisesti käytettyjen lähdesignaaleiden ominaisen laskostumisongelman vuoksi.

Eri vuosien julkaisumäärien lisäksi artikkelissa esitettiin lyhyesti julkaisuissa käytettyjä menetelmiä. Suodatinmallinnuksessa käytetään vain kahta menetelmää, kun taas lähdesignaalien generoimiseen tarkoitetut algoritmit voidaan jakaa neljään pääryhmään. Jokainen näistä ryhmästä lähestyy laskostumisongelmaa eri perspektiivistä.

Lisäksi artikkelissa käsiteltiin virtuaalianalogiasynteesin nykytrendejä sekä mahdollisia tulevaisuuden suuntauksia. Lähdesignaalien generoiminen ei ole täysin ratkaistu tehtävä, sillä halutuista kolmesta ominaisuudesta vain kaksi on saavutettavissa olemassa olevilla menetelmillä. Tämä tarkoittaa, että optimaalisen lähdesignaali-algoritmin kehittäminen pysyy tutkimuskohteena tulevaisuudessakin. Lisäksi todettiin, että analogiasyntetisaattoreiden lähdesignaalien mallinnus tulee olemaan yksi tutkimuskohde lähdesignaali-algoritmien tutkimuksessa.

Toisaalta suodatinmallinnuksessa laskennallisen kuorman optimointi aistihavainnon kannalta olennaisiin ominaisuuksiin tulee olemaan yksi tulevaisuuden tutkimuskohteista. Lisäksi useampia syntetisaattorisuodattimia tullaan tulevaisuudessa varmasti mallintamaan.

VIITTEET

- [1] SMITH J O, Physical modeling synthesis update, *Computer Music Journal*, **20**(1996), 44–56.
- [2] VÄLIMÄKI V, PAKARINEN J, ERKUT C & KARJALAINEN M, Discrete-time modelling of musical instruments, *Reports on Progress in Physics*, **69**(2006), 1–78.

Täydellinen viitelistaus virtuaalianalogiasynteesin julkaisuista (linkkeineen) on saatavilla verkkosivulla <http://www.acoustics.hut.fi/~jpekonen/Papers/ap2011/>. Viitelistaus löytyy myös samansisältöisestä englanninkielisestä artikkelista, joka tullaan julkaisemaan Forum Acusticum -konferenssissa kesällä 2011.