

Virtuaalista nostalgiaa – digitaalinen vähentävä äänisynteesi

Vesa Välimäki ja Antti Huovilainen

Johdanto

Virtuaalianalogisella äänisynteessillä tarkoitetaan laskentamenetelmiä, jotka matkivat 1960- ja 1970-luvuilla valmistettujen elektronisten syntetisaattoreiden toimintaperiaatteita ja sointia. Virtuaalianaloginen äänisynteesi toteutetaan käytännössä tietokoneohjelmalla. Tässä artikkelissa tarkastelemme digitaalisia äänisynteesimenetelmiä, joiden tuottama ääni kuulostaa analogiselta syntetisaattorilta. Luokittelemme nykyisin tunnetut oskillaattori- ja suodintekniikat ja esitämme uudet menetelmät sahalaita-aallon tuottamiseen ja Moogin alipäästösuotimen epälineaariseen mallintamiseen. Aluksi määrittelemme lyhyesti synteesimenetelmien eri luokat ja annamme muutamia esimerkkejä niihin kuuluvista menetelmistä. Pohdimme myös virtuaalianalogisen synteesin sijoittumista luokkiin.

Äänisynteesimenetelmien luokittelu

Julius Smith esitti 1990-luvun alussa synteesimenetelmien luokittelun, joka on edelleen ajankohtainen (Smith 1991). Hän jakoi synteesimenetelmät neljään luokkaan: abstraktit algoritmit, äänitteiden muokkaaminen, spektrimallit ja sointimallit (ks. taulukko 1). Lisätietoa äänisynteesimenetelmistä ja niiden vertailu on tarjolla Teknillisessä korkeakoulussa tuotetussa raportissa (Tolonen – Välimäki – Karjalainen 1998).

Abstraktit algoritmit ovat tyypillisesti kekseliäitä laskentamenetelmiä, joilla voidaan tuottaa tehokkaasti rikkaita sointivärejä mutta jotka eivät perustu mihinkään luonnossa tavattuun äänentuottoperiaatteeeseen tai ihmisen kuulon

Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet VLSI Solution Oy ja Suomen Akatemia (projekti nro 104934, *Control, Analysis, and Parametric Synthesis of Audio Signals*). Erityiskiitokset ansaitsevat VLSI Solution Oy:n Teppo Karema ja Tomi Valkonen, joiden kanssa kirjoittajat ovat suunnitelleet virtuaalianalogisia synteesialgoritmeja. Minimoogin valokuvan (ks. kuva 1) antoi käyttöömmme Laurent de Soras ja sitä käsitteli Jussi Hynninen.

ominaisuuksiin. Tyypiesimerkkejä ovat FM-synteesi (Chowning 1973) ja Karplus–Strong-algoritmi (Karplus & Strong 1993). Amerikkalaisen tietokoneusiikkisäveltäjän John Chowningin keksimä FM-synteesi on erittäin suosittu varhainen synteesimenetelmä. Sen yksinkertaisimmassa muodossa siniaallolla moduloidaan toisen siniaallon taajuutta. Kun molemmat siniaallot ovat äänitaajuusalueella, saadaan spektriltään rikas ääni, jossa on runsaasti harmonisia osasäveliä. Karplus–Strong-algoritmi puolestaan on abstrakti menetelmä, jossa lyhyttä kohinapursketta toistetaan aaltotaulukkosynteesin tapaan, mutta sitä muokataan jokaisen toistokerran jälkeen. Muokkaus tehdään laskemalla peräkkäisten näytearvojen keskiarvo, jolla korvataan toinen näytteistä. Tuloksena on hämmästyttävästi kitaran kielen näppäilyltä kuulostava ääni, vaikka menetelmä on ilmeisesti keksitty sattumalta äkillisen neronleimauksen tuloksena. Abstraktien algoritmien luokkaan Smith katsoo kuuluvan myös analogisista syntetisaattoreista tutun vähentävän synteesin periaatteen, joka sinänsä on vain nokkela äänentuottotapa, joka oli mahdollista toteuttaa 1960-luvun elektroniikalla.

Abstraktit algoritmit	Äänitteiden muokkaus	Spektrin mallinnus	Soitinmallinnus
<ul style="list-style-type: none"> – FM-synteesi – Karplus–Strong-algoritmi – Analoginen vähentävä synteesi 	<ul style="list-style-type: none"> – Aaltotaulukko-synteesi – Sämpläys 	<ul style="list-style-type: none"> – Additiivinen synteesi – Sinimallinnus – Lähde-suodinmalli 	<ul style="list-style-type: none"> – Aaltojohtomallinnus – Moodisynteesi – Virtuaalianaloginen synteesi

Taulukko 1. Äänisynteesimenetelmien luokitus Smithin (1991) mukaan ja muutamia esimerkkejä kuhunkin luokkaan kuuluvista menetelmistä.

Äänitteiden muokkaus on ollut jo parin vuosikymmenen ajan suosittu äänisynteesimenetelmä. Aaltotaulukkosynteesi ja sämpläys ovat tuttuja esimerkkejä, jotka perustuvat tietokoneen muistin hyväksikäyttöön. Aaltotaulukkosynteesissä tuotetaan harmonista ääntä toistamalla äänitteen yksittäisestä jaksosta tallennettua aaltomuotoa. Sämpläyksessä talletetaan digitaalisesti pitkiäkin äänitteitä ja lyhyehköjä äänitapahtumia (esimerkiksi koiran haukhdus), joita voidaan tallettaa sellaisenaan ja toistaa eri nopeudella. Sämplereihin käyttäjä voi yleensä itse äänittää uusia sampleja. Useimmat digitaalipianot ovat sample-heitä, vaikka käyttäjä ei voi tallettaa niihin omia äänitteitään.

Spektrimallit ovat synteesimenetelmiä, jotka jäljittelevät äänen tajuusominaisuuksia (Serra & Smith 1990). Taustalla on ymmärrys siitä, että ihmiskorva analysoi kuulemiaan ääniä oleellisesti taajuusanalysointitapaan. Perusesimerkkejä ovat additiivinen synteesi ja sen modernit versiot sinimallinnus ja sini-kohinamallinnus. Additiivisessa synteesissä haluttu ääni tuotetaan yhdistämällä siniääniä, joista kukin yleensä jäljittelee halutun äänen yhtä ylä-äänestä. Sinimallinnus on kehittyneempi versio, jossa ääntä analysoidaan FFT-menetelmällä ja siitä poimitaan suuri määrä sinikomponentteja, jotka synteesivaiheessa tuotetaan keinotekoisesti. Vähentävä synteesi voidaan tulkita myös

spektrimallinnusmenetelmäksi. Tällöin tarkoitetaan signaalianalyysiin perustuva ns. lähde-suodinmallia, jossa herätesignaali ja sitä muokkaava suodin yhdessä jäljittelevät tiettyä spektriä. Perinteisesti analogisissa syntetisaattoreissa ei ollut mahdollisuutta näin hienostuneeseen äänen mallintamiseen.

Taulukon 1 neljäs luokka, soitinmallinnus, merkitsee soittimen äänentuottoperiaatteen matkimista tietokoneohjelman avulla. Tästä käytetään myös nimitystä soittimien fysikaalinen mallinnus (engl. *physical modeling of musical instruments*). Varhaisimmat mallinnuskokeilut tehtiin 1970-luvun alussa, ja tutkimus vilkastui 1990-luvulla. Ensimmäinen soitinmallinnukseen perustuva kaupallinen syntetisaattori, Yamaha VL-1, julkistettiin vuonna 1994 (Marans 1994). Sittemmin tämä menetelmä on yleistynyt, ja se on tarjolla muun muassa PC-tietokoneiden äänikorteissa. Tunnetuin soitinmallinnusmenetelmä on aaltojohtomallinnus (engl. *waveguide modeling*), joka soveltuu erinomaisesti puhallin- ja kieli-soittimien laadukkaaseen synteisiin (Smith 1992; Karjalainen – Välimäki – Tolonen 1998; Laurson ym. 2001). Moodisynteesi (Adrien 1991) on toinen mallinnustekniikka, jossa soittimen tai sen osan värähtelymoodit mallinnetaan yksitellen. Soitinmallinnusmenetelmien luokittelu ja useiden menetelmien esittely on julkaistu muualla (Välimäki 2004).

Analogisia syntetisaattoreita mallintavat synteesisen menetelmät voidaan katsoa kuuluvaksi soitinmallinnuksen piiriin, vaikka yleensä tämä luokka sisältää lähinnä akustisten soittimien mallinnusmenetelmiä. Fyysisen maailman lainalaisuuksien sijaan virtuaalianalogiasynteisissä mallinnetaan syntetisaattorin elektronisten piirien toimintaa. Tässä artikkelissa esiteltävät tulokset voidaan siten tulkita analogisten äänisyntetisaattorien mallinnukseksi, vaikka menetelmät on alun perin kehitetty abstrakteina algoritmeina.

Analoginen äänisynteesi

Äänisynteessin historia alkaa tulkinnasta riippuen joko 1800-luvun loppupuolelta, jolloin rakennettiin erilaisia sähkömekaanisia soittimia, tai jostain vuodesta 1900-luvulla (Chadabe 1997). Yksi äänisynteessin merkittävimpiä keksintöjä on Robert Moogin kehittämä modulaarinen elektroninen soitin, jonka hän tuotti 1960-luvun puolivälissä (Moog 1965a). Aluksi Moog-syntetisaattorit koostuivat erillisistä laitteista, jotka voitiin kytkeä yhteen johdoilla erilaisiksi kokonaisuuksiksi. Eri osia olivat muun muassa oskillaattorit, suodattimet, verhoikärageneraattorit ja koskettimistot. Kaikki osat sisällytettiin samaan laitteeseen 1970-luvun alussa, ja siitä lähtien syntetisaattorit ovat yleensä olleet pienen sähköurun näköisiä elektronisia kosketinsoittimia. Sekvensserien ja MIDI-formaatin kehityttyä 1990-luvulla syntetisaattoreita alettiin jälleen valmistaa ilman koskettimistoa, koska ohjaava laite saattoi olla tietokoneen sekvensseriohjelma tai toisen syntetisaattorin koskettimisto.

Analogisen äänisynteessin periaatetta voidaan kutsua lähde-suodinjärjes-

telmäksi. Äänen tuotto perustuu yhden tai useamman oskillaattorin tuottamaan lähdesignaaliin, jota suodatetaan elektronisesti. Tätä periaatetta sanotaan vähentäväksi synteeksiksi, vaikkei vähennyslasku liity asiaan millään tavalla. Kenties nimitys perustuu siihen, että aiemmin tunnettiin additiivinen eli lisäävä synteesi, jolle sopi pariksi vähentävä synteesi. Joskus vähentävä synteesi pyritään tulkitsemaan siten, että suodattimen avulla poistetaan (”vähennetään”) joitain taajuuksia lähdesignaalista. Osa spektristä voi vaimentua suodatuksen seurauksena, mutta yleensä suodatitiin myös vahvistaa joitain taajuuksia. Siksi termin ’vähentävä’ käyttö on harhaanjohtavaa tässä yhteydessä, mutta nimen korjaaminen on nykyisin mahdotonta, koska se on yleistynyt.

Ensimmäinen kaupallisesti merkittävä analoginen syntetisaattori oli kuvassa 1 nähtävä Minimoog (Chadabe 1997). Siinä oli yhdistetty kolme oskillaattoria, alipäästösuodin ja kaksi verhoikäyrägeneraattoria koskettimiston kanssa yhdeksi näppärän kokoiseksi laitteeksi. Oskillaattoreiden tuottamaa sointiväriä voitiin säätää valitsemalla aaltomuoto muutamasta vaihtoehdosta. Tarjolla oli periodisten aaltomuotojen ohella erillisenä lähteenä valkoista ja vaaleanpunaista kohinaa. ADS-tyyppisellä (engl. *Attack-Decay-Sustain*) verhoikäyrägeneraattorilla (engl. *Envelope Generator, EG*) voitiin säätää vahvistuksen ja suodattimen rajataajuuden ajallinen vaihtelu yksittäisen äänen aikana. Minimoogia valmistettiin vuosien 1970 ja 1980 välillä noin 12 000 kappaletta, mitä pidettiin silloin suurena menestyksenä (Chadabe 1997, 153–155). Muita yrityksiä, jotka valmistivat 1970-luvulla analogisia musiikkisyntetisaattoreita, olivat ARP, Sequential Circuits, Oberheim, Roland, Korg ja Yamaha (Vail 1993).



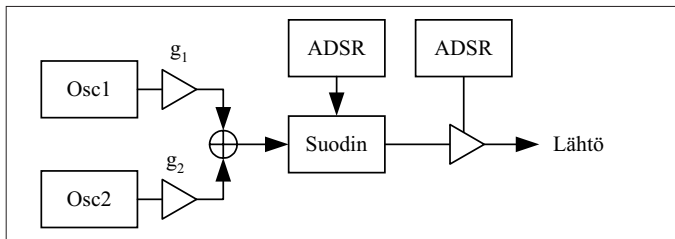
Kuva 1. Minimoog oli 1970-luvulla suosituin analoginen syntetisaattori.

Vuonna 1979 tuli markkinoille Prophet 5 -syntetisaattori, joka oli amerikkalaisen Sequential Circuitsin ensimmäinen moniääninen (polyfoninen) soitin (Chadabe 1997). Se poikkesi aikakautensa syntetisaattoreista, koska siinä oli mikroprosessori, jonka kautta elektroniikkaa ohjattiin, ja tämä mahdollisti para-

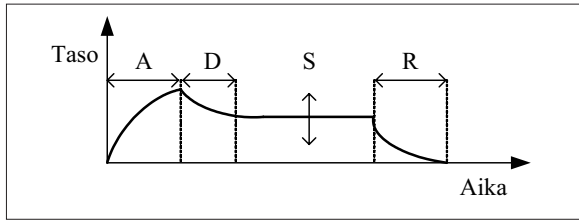
metrien tarkan säädön ja asetusten tallentamisen muistiin (Vail 1993). Prophet 5 oli silti analoginen syntetisaattori, koska sen äänentuotto ja suodatus perustui elektroniikkaan. Prophet 5 oli muutaman vuoden ajan maailman suosituimpia syntetisaattoreita. Sitä valmistettiin yli 7 000 kappaletta (Vail 1993).

Nykyään Prophet 5:n lohkoavaiota voidaan pitää klassikkona, sillä juuri sellaisena monet asiantuntijat nykyisin ajattelevat vähentävän synteessin periaatteen. Prophet 5 -syntetisaattorissa on kaksi oskillaattoria, alipäästösuodin, kaksi verhoikärgeneraattoria ja matalataajuusoskillaattori. Kuva 2 näyttää tämän yleisperiaatteen. Oskillaattoreissa on valittavana sahalaita-, kolmio- ja suorakulmainen aaltomuoto. Suorakulmaisen aallon pulssinleveyttä voidaan säätää, joten erikoistapauksena on mukana neliöaalto. Lisäksi ääneen voidaan yhdistää kohinaa. Oskillaattorien keskinäinen osuus äänessä voidaan säätää vahvistusten g_1 ja g_2 avulla. Kun oskillaattorit viritetään hieman eri vireeseen, ääneen saadaan huojuntaa, joka kuulostaa luonnolliselta. Näin saatua spektriltään rikasta ääntä muokataan alipäästösuotimella. Suodatinten periaatteista kerrotaan lisää myöhemmin tässä artikkelissa.

Verhoikäyrällä tarkoitetaan äänen voimakkuuden käyttäytymistä ajan myötä. Yleisin verhoikäyrfunktio on ADSR-käyrä (A = *Attack time* eli alkuaika, D = *Decay time* eli vaimenemisaika, S = *Sustain level* eli pitotaso, R = *Release time* eli päästöaika), jolla voidaan säätää äänen syttymisnopeus, vaimenemisaika ja taso, jolle ääni jää soimaan jatkuvuustilassa, sekä loppuvaimenemisaika. Kuva 3 esittää neliparametrisen verhoikäyrgeneraattorin toimintatavan. Samanlaista verhoikäyrgeneraattoria käytetään vähentävässä synteessissä sekä äänen kokonaisamplitudin että suodatinten ominaisuuksien säätämiseen, kuten nähdään kuvasta 2.



Kuva 2. Vähentävän synteessin periaate, joka toteutettiin lähes sellaisenaan Prophet 5 -syntetisaattorissa 1970-luvun lopussa. ADSR-lohkot sisältävät kuvan 3 mukaisesti toimivan verhoikäyrgeneraattorin.



Kuva 3. ADSR-verhokäyrägeneraattori (engl. Attack-Decay-Sustain-Release) säätää äänen aluke-, alkuvaimenemis- ja päästöajan pituuden sekä pitotason.

Verhokäyrägeneraattorien ohella analogisissa syntetisaattoreissa on yksi tai useampi matalataajuusoskillaattori (engl. *Low Frequency Oscillator, LFO*), jota käytetään moduloimaan oskillaattoreita ja suotimia. Tämä on yksi tekniikka, jolla pyritään välttämään staattinen ja tylsä äänensävy. Matalataajuusoskillaattorilla eli LFO:lla tarkoitetaan oskillaattoria, jonka taajuus on kuuloalueen alapuolella. Sen taajuus ei yleensä riipu soivasta nuotista. LFO tuottaa ainakin kolmio- ja neliöaaltoa, monesti myös siniaaltoa sekä nousevaa ja laskevaa sahalaita-aaltoa. LFO:lla saadaan äänenkorkeuden hitaasta noususta ja laskusta vibraton kautta aina nopeita äänitehostemaisia surinoita, kun sillä ohjataan oskillaattorin taajuutta tai suodattimen rajataajuutta. Esimerkiksi Prophet 5 -syntetisaattorissa LFO voidaan reitittää oskillaattorien taajuuksiin, pulssinleveyksiin ja suotimen rajataajuuteen.

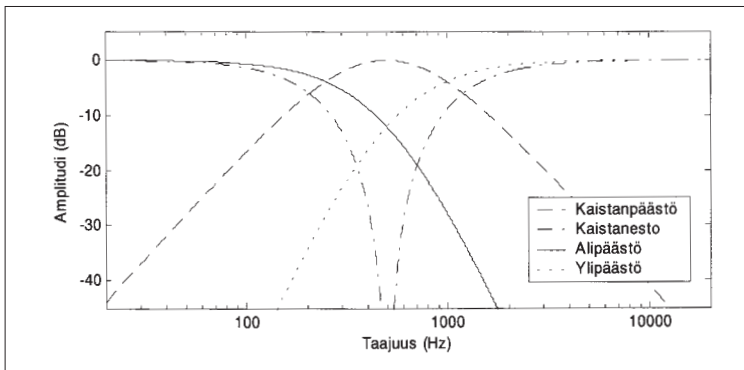
Syntetisaattorista riippuen modulaatiolla on yleensä joitakin kiinteästi määrittäjä kohteita, kuten vahvistin ja suotimen rajataajuus verhokäyrägeneraattoreilla, sekä joukko valittavia kohteita, kuten esimerkiksi oskillaattorin taajuus ja pulssinleveys tai suotimen rajataajuus. Edistyneissä syntetisaattoreissa on ns. modulaatiomatriisi, jonka avulla mikä tahansa modulaatiolähde voi moduloida mitä tahansa kohdetta. Lisäksi ulkoisia herätteitä voidaan reitittää joihinkin kohteisiin. Tyypillisesti ainakin sävelkorkeudella voidaan ohjata suotimen rajataajuutta. Joissain syntetisaattoreissa oskillaattorit voivat moduloida toisiaan ja suodinta.

Vähentävän synteessin suodattimet

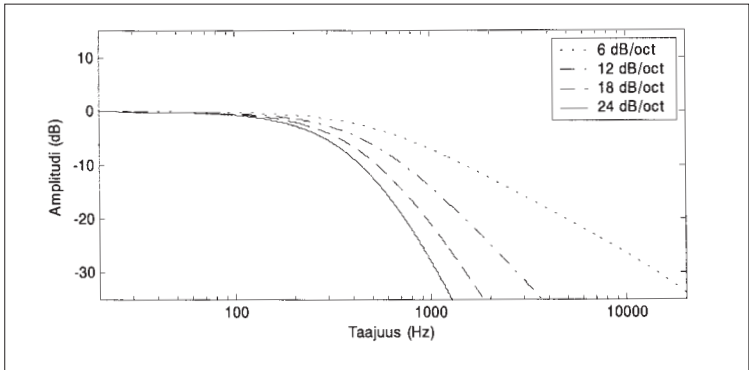
Suotimet luokitellaan taajuusvasteen tyypin perusteella. Yleisiä tyypejä ovat muun muassa alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- ja kaistanestosuodin (ks. kuva 4). Lisäksi saatetaan käyttää monimutkaisempia suotimia, kuten ääntövähäisiä matkivia vokaalisuotimia ja erilaisia suodinpankkeja. Suodintyypeistä alipäästö on ehdottomasti yleisin. Se saattaa olla syntetisaattorin ainoa suodin. Joissakin syntetisaattoreissa on mahdollisuus käyttää kahta suodinta yhtä aikaa, jolloin toinen niistä on yleensä alipäästösuoitin. Syy alipäästösuoitimen yleisyyteen on vähentävän synteessin perusteissa: oskillaattorit tuottavat aaltomuotoja, joiden spektri ulottuu äärettömyyteen, ja ne kuulostavat yksinään erittäin säri-

sevilta ja epämiellyttäviltä. Alipäästösuoitin tai kaistanpäästösuoitin poistaa spektristä ylimmät harmoniset komponentit, jotka kuulostavat epämiellyttäviltä. Näin suodatus matkii akustisissa soittimissa esiintyvää spektrin vaimenemista. Poikkeuksen tähän muodostavat rumpuäännet, joissa pitää tarkoituksellisesti tuottaa spektri, joka ei vaimene tietyin taajuuden jälkeen. Tällaisissa äänissä käytetään usein ylipäästö- tai kaistanpäästösuotimia.

Vasteen tyyppin lisäksi suotimet eroavat taajuusvasteen jyrkkyydessä. Yleensä taajuusvaste laskee 12 tai 24 desibeliä oktaavia kohden. Myös 6 dB ja 18 dB suotimia voidaan käyttää. Kuuden desibelin suodin on erityisen hyödyllinen käytettynä jonkun muun suotimen kanssa. Toisinaan puhutaan myös suotimen asteluvusta tai napojen määrästä. Ensimmäisen asteen suotimen, jota kutsutaan myös yksinapaiseksi suotimeksi, vaste laskee tai nousee 6 dB oktaavilla. Vastaavasti toisen asteen suodin aiheuttaa 12 dB oktaavin nousun tai laskun. Koska kaistanpäästö- ja kaistanestosuotimissa vaste sekä nousee että laskee, niiden asteluku pitää olla vastaavasti kaksinkertainen taajuusvasteen jyrkkyyteen nähden. Monimutkaisemmissa suotimissa vasteen jyrkkyyden ja asteluvun välillä ei välttämättä ole enää helppoa suhdetta ja niiden asteluku ei määritä yksinkertaisella tavalla suotimen vasteen muotoa tai jyrkkyyttä. Kuva 5 havainnollistaa eriasteisten alipäästösuotimien taajuusvasteen jyrkkyyden.

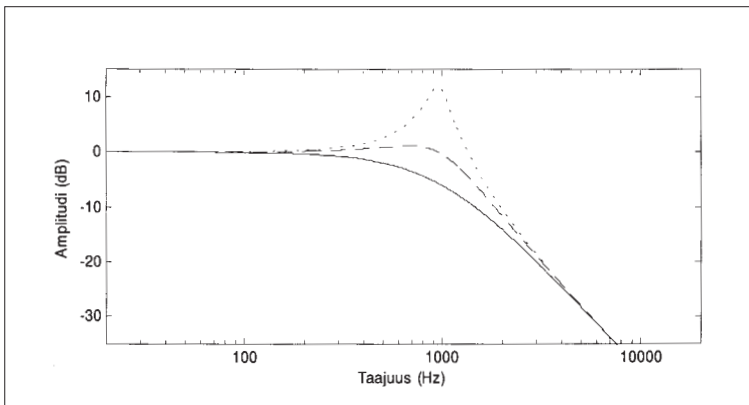


Kuva 4. Kaistanpäästö-, kaistanesto-, alipäästö- ja ylipäästösuodattimen taajuusvasteen itseisarvo. Taajuusasteikko on logaritminen.



Kuva 5. Alipäästösuodattimen taajuusvaste eri jyrkkyyksillä logaritmisella taajuusasteikolla.

Yksi synteesissä käytettävien suotimien erikoispiirre on resonanssi. Sillä tarkoitetaan suotimen taajuusvasteessa rajataajuuden kohdalla olevaa piikkiä, jonka korkeutta voidaan säätää. Vaikka resonanssi periaatteessa vastaakin akustisten soittimien taajuusvasteessa esiintyviä piikkejä, se kuulostaa käytännössä erilaiselta, koska suotimen rajataajuutta muutettaessa resonanssin taajuus muuttuu vastaavasti. Resonanssin käytöllä voidaan saada analogiselle syntetisaattorille tyypillisiä ja musiikillisesti mielenkiintoisia ääniä aikaiseksi. Monet klassisista syntetisaattorisoundeista perustuvat juuri resonanssin käyttöön. Kuva 6 näyttää, miten suotimen taajuusvaste muuttuu, kun resonanssia kasvatetaan.



Kuva 6. Alipäästösuodattimen taajuusvaste resonanssiparametrin eri arvoilla.

Virtuaalianalogisessa synteesissä on pohjimmiltaan kyse siitä, että vähentävä synteesi toteutetaan digitaalitekniikalla. Silloin koko synteesiprosessi on signaalinkäsittelyä eli numeerista laskentaa, ja se voidaan toteuttaa tietokoneohjelmalla. Digitaalinen oskillaattori tuottaa lukujonon, joka vastaa analogisen oskillaattorin tuottamaa säännöllisesti värähtelevää vaihtojännitettä. Digitaalinen suodin muokkaa lukujonoa siten, että tietyt taajuudet vaimenevat ja toiset taas korostuvat, aivan kuten analogisen syntetisaattorin suodin vaimentaa ja vahvistaa vaihtojännitesignaalin eri taajuuksia.

Virtuaalianalogisesta synteesistä tuli tunnettu kaupallinen termi vuonna 1995, kun ruotsalainen Clavia julkisti Nord Lead 1 -syntetisaattorin. Sitä mainostettiin erityisesti analogisella soinnillaan ja sillä, että nämplystekniikkaa ei käytetty lainkaan vaan kaikki soundit tuotettiin simuloimalla analogisen synteesin periaatteita (Clavia 2002). Aiemmin esimerkiksi Roland D-50 -syntetisaattori toimi likimain samalla periaatteella ja soitti myös nämplytyjä ääniä. Roland D-50 esiteltiin vuonna 1987 ja se oli yksi 1980-luvun lopun suosituimpia digitaalisia syntetisaattoreita. Vielä varhaisempi esimerkki analogiselta kuulostavan synteesin digitaalitoteutuksesta on Synergy 1980-luvun alusta (Kaplan 1981). Nykyisin suuri osa virtuaalianalogisista syntetisaattoreista on ohjelmistopohjaisia. Esimerkiksi saksalainen Native Instruments valmistaa useita synteesiohjelmiä. Yksi niistä, NI Pro-53, jäljittelee Prophet 5 -syntetisaattoria (Native Instruments 2004).

Se, että virtuaalianaloginen äänisynteesi on vaativampaa kuin yleensä ymmärretään, johtuu yksinkertaisesti siitä, että analogisia piirejä ei ole aivan helppoa matkia digitaalisesti. Analogisissa järjestelmissä korkeat taajuudet vaimenevat luonnollisesti eikä niiden käsittely vaadi erityisiä toimenpiteitä. Digitaalijärjestelmässä äänisignaalin taas pitää olla kaistarajoitettu eli tietyn rajataajuuden yläpuolella ei saa esiintyä äänienergiaa lainkaan. Kuitenkin vaaditaan, että digitaalitoteutus käyttäytyy varsin laajalla ja kuultavalla taajuusalueella oleellisesti samoin kuin analoginen syntetisaattori.

Toinen hankaluus liittyy siihen, että analogiset piirit eivät oikeasti käyttäydy yksinkertaisen teorian mukaisesti. Suurilla amplitudeilla niissä syntyy säröä, mikä johtuu tiettyjen elektronisten komponenttien käyttäytymisestä. Yleisten suunnitteluperiaatteiden mukaisesti toteutetussa digitaalijärjestelmässä vastavaa säröä ei synny, ja yleensä tätä pidetään digitaalisuuteen liittyvänä etuna. Analogista järjestelmää matkittaessa särökäyttäytyminen pitää kuitenkin toteuttaa digitaaliversioon erikseen, koska sen puuttuminen havaitaan äänessä. Seuraavassa esittelemme oskillaattorien ja suotimien digitaalisia vastineita.

Digitaaliset oskillaattorit

Analogisissa syntetisaattoreissa oskillaattori tuottaa useita vaihtoehtoisia aaltomuotoja. Monet niistä ovat ns. geometrisiä eli kulmikkaita signaaleita, kuten

kolmioaalto, neliöaalto ja saha-aalto. Lisäksi vaihtoehtoina on yleensä valkoinen kohina, joka kuulostaa sihinältä, sekä siniääni, joka kuulostaa lähinnä vihellyksestä. Kohinaa voidaan tuottaa digitaalisesti satunnaislukugeneraattorilla. Se on tietokoneohjelma, joka tuottaa pitkän jonon näennäisesti sattumanvaraisia lukuja, mutta lukujono alkaa jossain vaiheessa taas alusta (Dattorro 2002). Toistumiseen voi kuitenkin mennä esimerkiksi useita minutteja eikä ihmiskuulo silloin havaitse toistoa. Siniäänen tuottamiseen tunnetaan useita eri menetelmiä (Dattorro 2002; Turner 2004), mutta niihin ei tässä artikkelissa puututa.

Geometristen aaltomuotojen kulkimikkuus aiheuttaa ongelman digitaalitoteutuksessa. Kulkimikas aaltomuoto sisältää teräviä kohtia, jotka sisältävät korkeita taajuuksia teoriassa äärettömän korkealle. Aaltomuodon taajuussisältö ei siis rajoitu tietyn taajuuden alapuolelle eli se ei ole kaistarajoitettu. Jos analogisesta aaltomuodosta poimitaan suoraan näytteitä, aiheutuu laskostumista. Sillä tarkoitetaan digitaaliseen näytteenottoon liittyvää virheilannetta, jossa Nyquistin rajataajuuden (puolet näytteenottotaajuudesta) yläpuolella oleva äänienergia peilautuu pienemmille taajuuksille. Laskostuminen kuullaan epämiellyttävänä särönä, joka saattaa estää signaalin käytön musiikissa.

Käytännössä on ollut pakko keksiä digitaalisia menetelmiä, joilla voidaan tuottaa analogisilta perusaaltomuodoilta kuulostavia signaaleita, joissa laskostuminen on hiljaisempaa. Tällaiset digitaaliset oskillaattorit voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

1. Laskostumattomat menetelmät, joilla tuotetaan harmonisia komponentteja vain Nyquistin rajataajuuden alapuolella.
2. Melkein laskostumattomat menetelmät, joissa laskostuminen on erittäin vähäistä ja sen määrä voidaan säätää halutulle tasolle. Laskentatehon säästämiseksi on edullista sallia jonkin verran laskostumista.
3. Laskostumista vaimentavat menetelmät, joissa hyväksytään että laskostumista esiintyy, mutta se pyritään pitämään kohtuullisena.

Ensimmäinen luokka koostuu aaltomuotojen additiivisesta synteesistä. Perusmenetelmässä tuotetaan erikseen tarvittava joukko eritaajuisia siniääniä, jotka yhdistetään keskenään oikeissa amplitudi- ja vaiheasuhteissa (Chaudhary 1998). Menetelmä takaa täydellisen laadun, mutta se on laskennallisesti kovin raskas varsinkin pienillä perustaajuuksilla, missä harmonisia komponentteja tarvitaan valtavasti. Esimerkiksi kitaran alinta ääntä vastaavan 87 Hz saha-aallon tuottaminen 44 100 Hz näytetaajuudella vaatii noin 250 siniäänen tuottamisen yhtä aikaa. Joissain laskentaympäristöissä tällainen laskentataakka on liian suuri eikä reaaliaikainen synteesi onnistu edes yhdelle äänelle. Godfrey Winham ja Ken Steiglitz (1970) keksivät paremman menetelmän, joka perustuu sinifunktioiden aritmeettisen summan kaavaan. Yhdellä kaavalla saadaan silloin laskettua haluttu määrä siniääniä samanaikaisesti (Winham & Steiglitz 1970; Moorer 1976). Tässä menetelmässä jokaisen näytteen laskemiseen liittyy harmillisesti jakolasku, josta aiheutuu numeerinen ongelma (ajoittain erittäin suuri näytearvo) silloin, kun nimittäjän arvo on erittäin pieni (Steiglitz 1996). Jakolasku ja

numeerisen ongelman välttäminen ehtolauseella vaikeuttavat tämän menetelmän käyttöä. Toinen haittapuoli on se, että summakaavalla tuotetussa signaalissa kaikkien harmonisten amplitudi on aina sama. Geometrisissä aaltomuodoissa ylä-äänesten amplitudi laskee tietyn lain mukaisesti, esimerkiksi saha-aallossa jokaisen harmonisen amplitudi on kääntäen verrannollinen sen järjestyslukuun, ja summakaavalla tuotettua signaalia on siksi suodatettava jälkikäteen oikeantyyppisen spektrin luomiseksi.

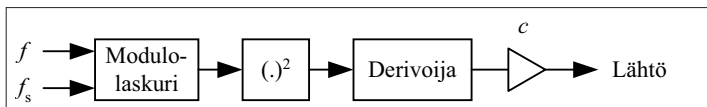
Lähes laskostumattomissa menetelmissä geometrinen aaltomuotojen epäjakkuuskohtaa pehmennetään siten, ettei spektrissä ole juurikaan ylimäärisiä laskostuneita komponentteja. Tim Stilsonin ja Julius O. Smithin (1996a) ehdottamassa BLIT-menetelmässä (engl. *Bandlimited Impulse Train*) kaistarajoitettu pulssi talletetaan taulukkoon, mistä sen arvoja luetaan synteesin aikana. Menetelmä on laadultaan erinomainen, mutta se vaatii muistia eikä ole laskennallisesti erityisen tehokas, koska jokaisessa jaksossa tarvitaan jakolasku. Jakolaskun tarve aiheutuu siitä, että menetelmässä pitää laskea jaksonpituus, joka on kääntäen verrannollinen perustaajuuteen. Muunnelma tästä menetelmästä on nimeltään minBLEP (engl. *Minimum-phase Bandlimited Pulse*) (Brandt 2001), ja siinäkin laskostuminen saadaan pidettyä hyvin kurissa ja kerran jaksossa tarvitaan jakolasku.

Kolmanteen luokkaan sisältyy kaksi menetelmää: siniaallon säröytys ja suodatus (Lane ym. 1997) sekä paraabeliaallon derivointi (engl. *Differentiated Parabolic Waveform*, DPW) (Välimäki 2005). Kutsumme niitä Lanen algoritmiksi ja DPW-menetelmäksi. Molemmat tekniikat aiheuttavat enemmän laskostumista kuin BLIT- tai minBLEP-menetelmät, mutta niiden laskenta on tehokasta eikä vaadi juurikaan muistia. Lanen algoritmissa tarvitaan ensimmäisen asteen suodin, jonka parametrit riippuvat perustaajuudesta, ja Butterworth-tyyppinen alipäästösuodin. Koska DPW-menetelmä on keksimämme uutuus, esittelemme sen tarkemmin seuraavassa.

Uusi menetelmä sahalaita-aallon tuottamiseen

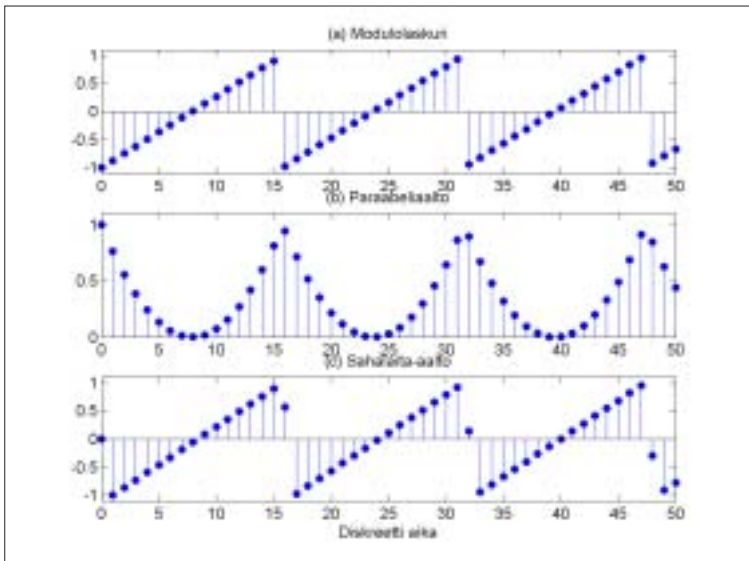
DPW-menetelmän yksinkertaisimmassa versiossa saha-aalto tuotetaan kolmessa vaiheessa, jotka esitetään kuvassa 7 (Välimäki 2005):

1. Tuotetaan tavallista digitaalista saha-aaltoa modulolaskurilla;
2. Korotetaan jokainen näytearvo toiseen;
3. Derivoidaan saatu aaltomuoto.

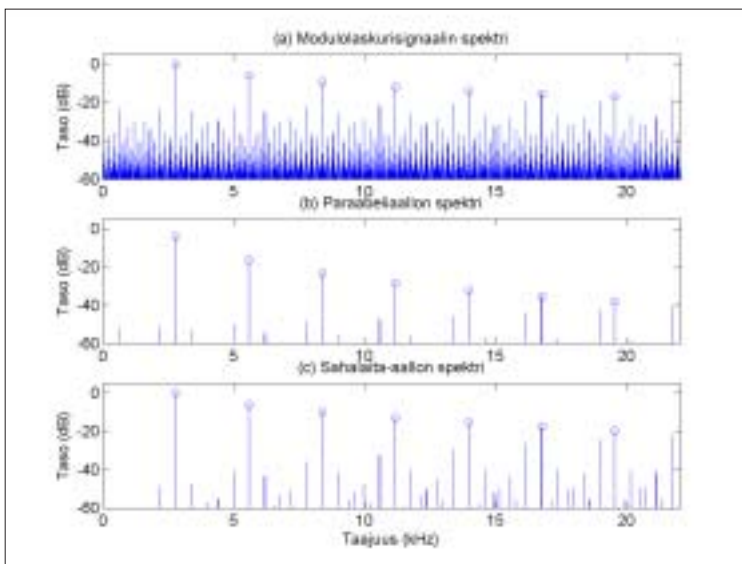


Kuva 7. Sahalaita-aallon tuottaminen DPW-menetelmällä.

Modulolaskurilla tarkoitetaan alkeellista saha-aaltogeneraattoria, jossa laskurin arvoa lisätään pienin askelin joka näytechetkellä, kunnes saavutetaan $+1$. Silloin arvosta vähennetään 2 ja laskentaa jatketaan taas askel kerrallaan. Näin saadaan nouseva lukujono, jonka arvo pysyy $-1:n$ ja $+1:n$ välillä. Lisäys on suuruudeltaan $2/f$, kun f on haluttu perustaajuus hertseinä ja näyteenottotaajuus on f_s . Modulolaskurista saatava digitaalinen signaali muistuttaa analogisesta saha-aallosta otettuja näytteitä, kuten nähdään kuvasta 8a, mutta se kuulostaa pahasti säröytyneeltä. Syy on se, että saha-aallon spektri laskee hitaasti taajuuden mukana (noin 6 dB oktaavissa), mutta se ei koskaan saavuta nollaa, ja kun tästä aallosta otetaan näytteitä tasavälein, kaikki Nyquistin rajataajuuden yläpuolelle sattuvat spektrikomponentit siirtyvät kuultaviksi häiriöiksi. Laskostuminen näkyy selvästi spektrikuvassa 9a. Siinä esitetään kuvan 8a aaltomuodon spektri. Sahalaita-aallon harmonisten komponenttien huiput on ympyröity, ja muu osa spektristä on laskostumisesta aiheutuvaa ylimääräistä häiriötä.



Kuva 8. DPW-menetelmän prosessoinnin aikana tuotetut signaalit: (a) lähtökohdana käytetty modulolaskurin signaali, (b) neliöön korotettu modulolaskurin signaali eli parabeliaalto ja (c) sahalaita-aalto, joka saadaan parabeliaallon peräkkäisten näytteiden erotuksena. Signaalin perustaajuus on 2793.8 Hz (MIDI-nuotti 101) ja näyteenottotaajuus on 44 100 Hz.



Kuva 9. DPW-menetelmässä käsiteltävien signaalien (ks. kuva 8) spektrit. Halutut harmoniset komponentit, jotka ovat perustaajuuden kokonaislukukerrannaisia (2793,8 Hz, 5587,6 Hz, 8381,4 Hz jne.) on merkitty ympyrällä. Muut spektreissä nähtävät komponentit johtuvat laskostumisesta ja kuullaan häiriönä.

Toiseen korottaminen muuttaa modulolaskurista lähtevän aaltomuodon siten, että nyt se koostuu toisen asteen polynomin eli paraabelin pätkistä, kuten nähdään kuvasta 8b. Tämän signaalin spektri laskee jyrkemmin kuin saha-aallon, kuten nähdään kuvasta 9b. Samalla laskostumisesta aiheutuva häiriö vaimenee (Välimäki 2005).

DPW-menetelmän viimeisessä vaiheessa paraabeliaalto derivoidaan ajan suhteen. Käytännössä derivointi voidaan korvata peräkkäisten näytteiden erotuksella. Signaaliarvot on lopuksi kerrottava vakiolla c , jonka arvoksi voidaan valita $f(4f)$. Tuloksena saadaan saha-aallon tapainen signaali, jonka spektrissä esiintyy laskostumista huomattavasti vähemmän kuin modulolaskurin tuottamassa signaalissa. Nämä seikat voidaan havaita kuvista 8c ja 9c. DPW-menetelmällä tuotettua aaltomuotoa voidaan käyttää digitaalisessa vähentävässä synteisissä saha-aallona. Siitä saadaan myös pulssiaalto vähentämällä kaksi aaltoa sopivassa vaiheessa.

Kolmioaaltoa varten voidaan kehittää vastaava menetelmä, joka vähentää laskostumista. Koska kolmioaallon spektri laskee luonnostaan jyrkemmin (12 dB oktaavissa) kuin saha-aallon spektri, laskostuminen ei ole yhtä paha ongelma kuin saha-aallossa. Siksi kolmiosignaali, joka toteutetaan ääniarvoissa suuntaa

vaihtavalla modulolaskurilla, on laadultaan varsin hyvä ja kelpaa käytettäväksi sellaisenaan digitaalisessa vähentävässä synteesissä.

Digitaaliset suodattimet

Perinteisesti digitaaliset suotimet toteutetaan ns. suoramuoto-IIR-suotimina, jotka vaativat mahdollisimman vähän laskentatehoa. Synteesiin ne eivät kuitenkaan sovi, koska siinä tarvitaan muuttuva suodin ja suoramuoto-IIR-suotimien kertoimien laskeminen on monimutkaista. Synteesissä suodattimen parametreja muokataan jatkuvasti modulaatioiden avulla, joten perinteisen IIR-suotimen laskeminen uudestaan koko ajan hidastaa laskentaa merkittävästi. Tämän vuoksi on kehitetty vaihtoehtoisia suotimia, joiden päivittäminen on yksinkertaisempaa. Näiltä suotimilta toivotaan yleensä seuraavia ominaisuuksia:

1. *Nopea päivitys.* Suotimen kertoimien arvojen laskemisen tulee olla mahdollisimman yksinkertaista, koska se joudutaan tekemään joka näytettä kohden.
2. *Rajataajuuden ja resonanssin riippumattomuus toisistaan.* Jos rajataajuuden muuttaminen vaikuttaa resonanssiin, molempia joudutaan muuttamaan, kun toinen muuttuu, ja se hidastaa laskentaa.
3. *Stabiiliisuus.* Suotimen lähtösignaali ei saa koskaan ”räjähtää” (kasvaa sallitun lukualueen ulkopuolelle) riippumatta siitä, mikä on tulossignaali tai miten parametrit muuttuvat, kunhan ne pysyvät sallitulla alueella.
4. *Samankaltainen vaste analogisen suotimen kanssa kuuloalueella.* Virtuaalianalogiset syntetisaattorit pyrkivät matkimaan analogisia vastineitaan, joten niiden pitää kuulostaa samalta.
5. *Mahdollisuus saada suodin itsevärähtelemään* (engl. *self-oscillation*). Kun resonanssia kasvatetaan tarpeeksi, monissa analogisissa suotimissa ääni alkaa ”kiertää” tai ”viheltää”. Suodin alkaa tuottaa siniaaltoja rajataajuudellaan.

Käytännössä edellä listatut ominaisuudet riippuvat toisistaan. Rajataajuuden ja resonanssin riippumattomuus helpottaa nopeaa päivitystä. Itseoskillaatio on osittain ristiriitainen stabiiliisuusvaatimuksen kanssa, sillä siinä suodin alkaa oskilloida eli soida itsekseen. Se liittyy myös rajataajuuden ja resonanssin riippumattomuuteen. Koska suodin alkaa oskilloida resonanssin ylittäessä tietyn arvon, on tärkeää, ettei rajataajuuden muutos saa suodinta vahingossa oskilloimaan. Toisaalta oskillointi ei saa yllättäen loppua, kun rajataajuutta muutetaan. On mahdotonta täyttää kaikkia kriteerejä täysin. Siksi suotimen suunnittelusta tulee kompromissi, jossa suodin ensin yritetään saada toimimaan mahdollisimman hyvin ja sitten lisätään erilaisia korjaustermejä, joiden ansiosta suodin toimii lähes ideaalisesti.

Useimmat digitaalisessa vähentävässä synteesissä käytettävät suotimet perustuvat samanlaisiin rakenteisiin kuin niiden analogiset esikuvat. Hal Chamberlinin

(1980) esittämä tilamuuttujasuodin (engl. *State Variable Filter, SVF*) oli ensimmäisiä digitaaliseen äänisynteesiin tarkoitettuja suotimia, ja se on edelleen suosittu. Kuten analogisesta vastineestaan, tästäkin saadaan yhtä aikaa alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- ja kaistanestolähdöt. Korkeilla taajuuksilla SVF-suotimessa muodostuu ongelmaksi epästabiilisuus, millä tarkoitetaan virhetilannetta, jossa suodattimen lähtösignaali kasvaa rajatta. Tämän vuoksi SVF-suotimen käyttö vaatii yleensä ylinäytteistystä eli laskentanopeuden moninkertaistamista, mikä lisää laskentakuormaa.

Myös perinteisiin IIR-suotimiin perustuvia suotimia voidaan käyttää pienin korjauksin. E-mu:n Dave Rossum on kehittänyt menetelmiä, joilla nämä saadaan täyttämään useimmat edellä esitetyistä kriteereistä. E-mu:n suotimet käyttävät ns. ARMAdillo-koodausta, jossa kertoimet koodataan tietyllä tavalla, joka mahdollistaa nopean päivittämisen, kun suotimet toteutetaan tätä varten kehitetyllä integroidulla piirillä (Rossum 1991). Menetelmän etu on se, että sillä voidaan toteuttaa periaatteessa mikä tahansa vaste, esimerkiksi ihmisäänen spektriä simuloiva suodin. E-mu:n suotimissa on myös sijoitettu epälineaarisuuksia suotimien sisään, jotka estävät ylivuodot ja tuovat ääneen analogista sävyä (Rossum 1992).

RC-piiri ja sen digitaalinen malli. Yksinkertaisin analoginen suodin on ns. RC-piiri, joka koostuu rinnakkain kytketyistä vastuksesta ja kondensaattorista. Koska suurin osa analogisissa syntetisaattoreissa käytettävistä suotimista perustuu RC-suotimeen, sen toimintaa on hyödyllistä tarkastella syvemmin. RC-suotimessa kondensaattoria varataan ja puretaan vastuksen läpi. Kondensaattori varautuu äärellisellä nopeudella, joka on lineaarisesti riippuvainen tulojännitteen ja kondensaattorin jännitteen erosta sekä kääntäen riippuvainen vastuksen ja kondensaattorin suuruudesta. RC-piiri ikään kuin hidastaa signaalia. Mitä nopeammin signaali muuttuu, sitä enemmän se vaimenee. Näin RC-piiri toimii alipäästösuoitimenä. Kuva 10 havainnollistaa RC-suotimen toimintaa.

Käytännön suotimissa kondensaattorin arvo on vakio ja vastuksen suuruutta säädetään jännitteellä. RC-suotimen toiminta voidaan mallintaa yksinkertaisesti digitaalisesti korvaamalla kondensaattorin jännite suotimen lähtösignaalin edellisellä arvolla. Näin seuraava lähtösignaalin arvo riippuu sisääntulon ja edellisen lähtösignaalin erotuksesta sekä vakiosta g , joka määrää rajataajuuden eli

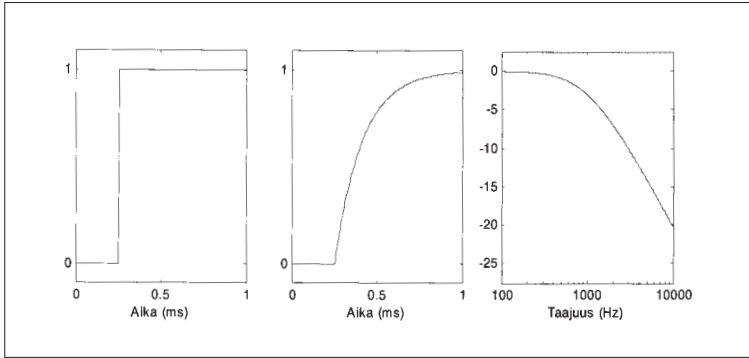
$$y(n) = y(n-1) + g[x(n) - y(n-1)]$$

missä

$$g = 1 - e^{-2\pi F_c / F_s}$$

ja $x(n)$ on sisään menevä eli tulosignaali, $y(n)$ on lähtösignaali, n on näyteindeksi, joka vastaa diskreettiä aikaa, F_c on rajataajuus hertseinä ja F_s on näytteenotto-taajuus hertseinä. Koska digitaalista suodinta näytteistetään äärellisellä nopeudella, g ei riipu suoraan rajataajuudesta, vaan eroaa siitä korkeilla taajuuksilla.

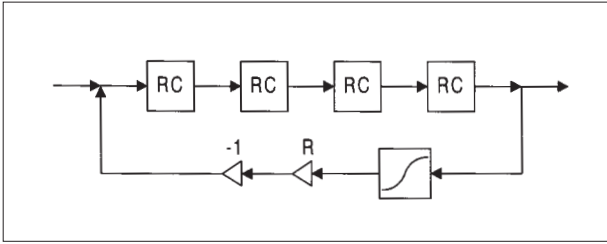
Suurin osa syntetisaattoreissa käytettävistä suotimista voidaan toteuttaa yhdistämällä RC-suotimia.



Kuva 10. Askelsignaali (vasemmalla) ja RC-piirin läpi mennyt pehmentynyt askel (keskellä) sekä RC-piirin amplitudivaste, josta nähdään että kyseessä on alipäästö-suodin.

Moogin suodin. Stilson ja Smith (1996b) esittivät digitaalisen version Moogin analogisesta suotimesta, jota käytettiin lähes kaikissa analogisissa Moog-syntetisaattoreissa (Moog 1965b). Kuva 11 näyttää tämän ns. tikapuusuotimen rakenteen. Kuten alkuperäinen analoginen toteutus, se koostuu neljästä ensimmäisen asteen alipäästösuotimesta eli RC-piiristä sarjassa. Myös resonanssi tehdään johtamalla osa lähtösignaalista vahvistettuna takaisin tuloon, kuten Moogin alkuperäisessä suotimessa. Samanlaisen toteutustavan ansiosta digitaalinen Moog-suodin kuulostaa varsin samankaltaiselta kuin analoginen suodin. Yksinkertainen rakenne mahdollistaa nopean kertoimien päivityksen. Rajataajuus ja resonanssi ovat lähes riippumattomia, mikä varmistaa suotimen stabiiliuden ja osaltaan auttaa päivityksen nopeutta.

Resonanssi toteutetaan Moogin suotimessa johtamalla osa lähtösignaalista käänteisenä takaisin tuloon. Tämä saa aikaan piikin taajuusvasteessa rajataajuuden kohdalla. Mikäli takaisinkytkennän vahvistusta kasvatetaan tarpeeksi (yli nelinkertaiseksi), suodin alkaa oskilloida. Jottei oskilloinnin amplitudi kasvaisi rajatta, suodattimeen on syytä lisätä epälineaarinen rajoitin. Se vähentää vahvistusta, kun amplitudi kasvaa, ja rajoittaa näin värähtelyn amplitudin halutuksi. Epälineaarisuudeksi kelpaa periaatteessa mikä tahansa pehmeästi kyllästyvä (saturoituva) funktio. Hyperbolinen tangentti on yksi sopiva funktio, ja se vastaa hyvin analogisissa piirissä esiintyvää säröä (Huovilainen 2004). Koska digitaalisessa suotimessa on oltava viive takaisinkytkennässä lähdön ja tulon välillä, oskillointiin vaadittava vahvistus riippuu jonkin verran rajataajuudesta. Tässä tapauksessa takaisinkytkennässä oleva säröytin auttaa, koska muuten suotimen ulostulo kasvaisi rajattomasti, vaikka vahvistus pidettäisiin alle nelinkertaisena.



Kuva 11. Moogin alipäästösuodattimen rakenteessa on neljä RC-piiriä sarjassa ja takaisinkytkentä epälineaarisen funktion, resonanssia säättävän R-kertoimen ja vaiheen käännön (-1) kautta.

Toteutusimerkkejä

Seuraavaksi esittelemme, kuinka kaksi klassista analogista syntetisaattorisointia toteutetaan esittelemiemme digitaalisten menetelmien avulla. Kuvassa 12 esitetään tyypillisen analogisen basso-soundin lohkokaavio. Tässä soinnissa käytetään vain yhtä oskillaattoria ja yhtä alipäästösuodinta. Lisäksi suotimella ja kokonaisamplitudilla (vahvistuksella) on verhokäyrä. Verhokäyrän arvo skaalataan halutuksi ja lisätään nuottiin kaavalla

$$F = F_0 2^{\frac{\text{keyfollow}(\text{note} - 60)}{12} + \text{envamount} * \text{env}}$$

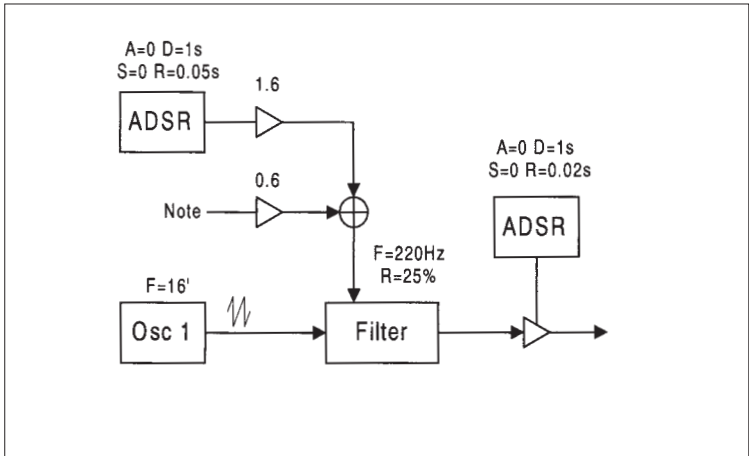
missä *envamount* on kerroin, joka määrää, kuinka paljon verhokäyrä vaikuttaa suotimeen, ja *env* on verhokäyrän nykyinen arvo. Suotimessa käytetään jonkin verran resonanssia, joka poistaa soundista liian pehmeiden. Suotimen ja äänenvoimakkuuden verhokäyrät ovat lähes identtisiä: niissä on erittäin nopea aluke ($A = 0$) ja melko hidas lasku ($D = 1$ s) nolatasolle ($S = 0$). Nopea päästöajan arvo (kokonaisamplitudille $R = 0,02$ s) tarkoittaa äänen nopeaa sammuusta, kun kosketin vapautetaan – tämä vastaa basson värähtelevän kielen sammutusta.

Kuva 13 näyttää analogisyntetisaattoreille tyypillisen ”pad”-soundin rakenteen. Ääni muistuttaa jousiorkesteria, ja se soveltuu hyvin taustasointujen soittamiseen. Rakenne on samankaltainen kuin bassosoundissa (ks. kuva 12), mutta siinä on yhden sijasta kaksi sahalaitaoskillaattoria, jotka summataan yhteen yhtä voimakkaina. Oskillaattorit on viritetty normaaliavireeseen (8’), mutta toinen niistä on hieman yläavireessä (9 senttiä eli 9 tasavireisen puolisävelaskelen sadasosaa), jolloin ääneen tulee miellyttävää huojuntaa. Oskillaattorit johdetaan alipäästösuotimen läpi, joka on muuten staattinen, mutta soitettava nuotti

vaikuttaa sen rajataajuuteen jonkin verran. Tällöin suotimen rajataajuus laskeaan kaavalla

$$F = F_0 2^{\frac{\text{KeyFollow}(\text{note} - 60)}{12}}$$

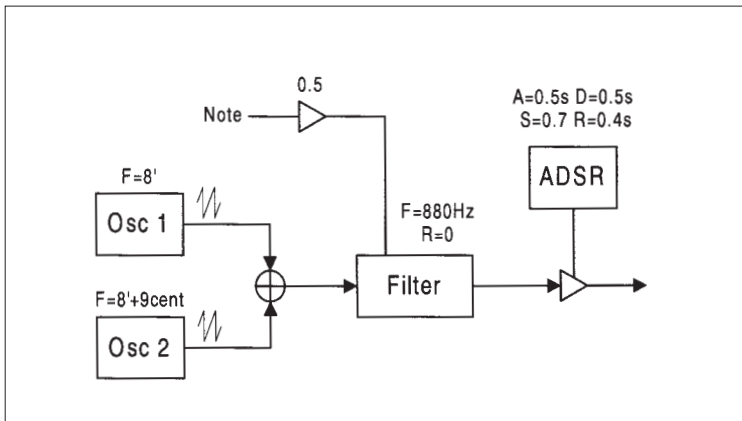
missä F on lopullinen taajuus, F_0 on rajataajuus keski-C:lle (MIDI-nuotti 60), note on nuotin MIDI-arvo ja KeyFollow on kerroin, joka määrää kuinka paljon soitetava nuotti vaikuttaa taajuuteen. Äänenvoimakkuuden verhokäyrä nousee melko hitaasti ($A = 0,5$ s), laskee samalla vauhdilla ($D = 0,5$ s) noin kahteen kolmasosaan huipputasostaan ($S = 0,7$), jossa se pysyy kunnes kosketin päästetään ylös. Silloin ääni vaimenee hieman nopeammin kuulumattomiin ($R = 0,4$ s).



Kuva 12. Tyypillinen vähentävän synteesin toteutus bassosoundille. ADSR-verhokäyrägeneraattorien ja suotimen parametrit näytetään lohkojen yläpuolella.

Yhteenveto

Virtuaalianaloginen synteesi on moderni suuntaus digitaalisessa äänisynteesissä. Tietokoneella matkitaan 1970-luvun analogisten musiikkisyntetisaattoreiden oskillaattorien, suotimien ja muiden osien toimintaa. Tässä artikkelissa esittelimme vähentävän äänisynteesin historiaa ja uusia digitaalisia menetelmiä geometrinen aaltomuotojen ja resonanssisuotimien toteuttamiseen. Helposti ymmärrettävä ja laadultaan kohtuullisen hyvä saha-aaltogeneraattori perustuu



Kuva 13. Vähentävälle synteesille tyypillisen pad-soundin rakenne.

paraabeliaallon suodattamiseen. Menetelmä lienee toiseksi yksinkertaisin tapa tuottaa saha-aaltoa heti perinteisen laskuriperiaatteen jälkeen, joka on äänenlaadultaan lähes käyttökelvoton. Suodattimista käsitelimme Moogin tikapuu-suotimen digitaalisen toteutuksen, joka perustuu neljän yksinkertaisen suodattimen yhdistelmään ja takaisinkytkentään. Lopuksi näytimme, miten kaksi perinteistä vähentävän synteesin sointia toteutetaan kuvatuilla menetmillä. Tuloksena saadaan nostalgisia soundeja, vaikka äänet lasketaan nykyaikaisella tietokoneella.

Kirjallisuus

- Adrien, Jean-Marie 1991. *The Missing Link: Modal Synthesis*. Teoksessa *Representations of Musical Signals*. Ed. G. De Poli – A. Piccialli – C. Roads. Cambridge, MA: MIT Press. 269–297.
- Brandt, Eli 2001. *Hard Sync Without Aliasing*. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (Havana, Cuba, 2001). <http://www-2.cs.cmu.edu/~eli/L/icmc01/hardsync.html>.
- Chadabe, Joel 1997. *Electric Sound: The Past and Promise of Electronic Music*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Chamberlin, Hal 1980. *Musical Applications of Microprocessors*. Rochelle Park, NJ: Hayden Book Company.
- Chaudhary, Amar 1998. *Bandlimited Simulation of Analog Synthesizer Modules by Additive Synthesis*. *Audio Engineering Society 105th Convention*, esitelmä 4779 (F2) (San Francisco, CA, 1998).

- Chowning, John 1973. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *Journal of the Audio Engineering Society* 21 (7): 526–534.
- Clavia DMI AB 2002. The Virtual Analog Concept. <http://www.clavia.se/nordlead2/concept.htm>.
- Dattorro, Jon 2002. Effect Design – Part 3, Oscillators: Sinusoidal and Pseudonoise. *Journal of the Audio Engineering Society* 50 (3): 115–146. <http://www.stanford.edu/~dattorro/research.html>.
- Huovilainen, Antti 2004. Nonlinear Digital Implementation of the Moog Ladder Filter. *Proceedings of the Seventh International Conference on Digital Audio Effects* (Naples, Italy, 2004). 61–64. <http://dafx04.na.infn.it/>.
- Karjalainen, Matti – Vesa Välimäki – Tero Tolonen 1998. Plucked-String Models: From the Karplus–Strong Algorithm to Digital Waveguides and Beyond. *Computer Music Journal* 22 (3): 17–32. <http://www.acoustics.hut.fi/publications/>.
- Kaplan, S. Jerrold 1981. Developing a Commercial Digital Sound Synthesizer. *Computer Music Journal* 5 (3): 62–73.
- Karplus, Kevin & Alex Strong 1983. Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres. *Computer Music Journal* 7 (2): 43–55.
- Lane, John – Dan Hoory – Ed Martinez – Patty Wang 1997. Modeling Analog Synthesis with DSPs. *Computer Music Journal* 21 (4): 23–41.
- Laurson, Mikael – Cumhur Erkut – Vesa Välimäki – Mika Kuuskankare. 2001. Methods for Modeling Realistic Playing in Acoustic Guitar Synthesis. *Computer Music Journal* 25 (3): 38–49. <http://lib.hut.fi/Diss/2002/isbn9512261901/article6.pdf>.
- Marans, Michael 1994. The Next Big Thing: Can Computer-Modeled Instruments Free the Music Industry from Stagnation? *Keyboard* 20 (2): 98–118.
- Moog, Robert A. 1965a. Voltage-Controlled Electronic Music Modules. *Journal of the Audio Engineering Society* 13 (3): 200–206.
- 1965b. A Voltage-Controlled Low-Pass High-Pass Filter for Audio Signal Processing. *17th Annual Meeting of the Audio Engineering Society* esitelmä nro 413.
- Moorer, James A. 1976. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Discrete Summation Formulae. *Journal of the Audio Engineering Society* 24: 717–727.
- Native Instruments Software Synthesis GmbH 2004. Pro-53: The Second Coming of a Legend. <http://www.ni-pro53.com/>.
- Rossum, Dave 1991. The “ARMAdillo” Coefficient Encoding Scheme for Digital Audio Filters. *Proceedings of the IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics* (New Paltz, NY, 1991). 129–130.
- 1992. Making Digital Filters Sound Analog. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (San Jose, CA, 1992). 30–33.
- Serra, Xavier & Julius O. Smith 1990. Spectral Modeling Synthesis: A Sound Analysis/Synthesis System Based on a Deterministic plus Stochastic Decomposition. *Computer Music Journal* 14 (4): 12–24.
- Smith, Julius O. 1991. Viewpoints on the History of Digital Synthesis. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (Montreal, Canada). 1–10. Laajennettu versio saatavana [www.osoitteesta http://www.ccrma.stanford.edu/~jos/kna/](http://www.ccrma.stanford.edu/~jos/kna/).
- 1992. Physical Modeling Using Digital Waveguides. *Computer Music Journal* 16 (4): 74–91. <http://ccrma.stanford.edu/~jos/pmudw/>.
- Steiglitz, Ken 1996. *A Digital Signal Processing Primer with Applications to Digital Audio and Computer Music*. Redwood City, USA: Addison-Wesley.
- Stilson, Tim & Julius O. Smith 1996a. Alias-Free Digital Synthesis of Classic Analog Waveforms. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (Hong Kong, China). 332–335. <http://ccrma.stanford.edu/~stilti/papers/>.
- 1996b. Analyzing the Moog VCF with Considerations for Digital Implementation. *Proceedings of the International Computer Music Conference* (Hong Kong, China). 398–401. <http://ccrma.stanford.edu/~stilti/papers/>.

- Tolonen, Tero – Vesa Välimäki – Matti Karjalainen 1998. *Evaluation of Modern Sound Synthesis Methods*. Raportti nro 48, Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo. <http://www.acoustics.hut.fi/publications/>.
- Turner, Clay S. 2004. Recursive Discrete-Time Sinusoidal Oscillators. *IEEE Signal Processing Magazine* 20 (3): 103–111.
- Vail, Mark 1993. *Vintage Synthesizers*. San Francisco, CA: Miller Freeman Books.
- Välimäki, Vesa 2004. Physics-Based Modeling of Musical Instruments. *Acta Acustica united with Acustica* 90 (4): 611–617.
- 2005. Discrete-Time Synthesis of the Sawtooth Waveform with Reduced Aliasing. *IEEE Signal Processing Letters* 12 (3): 214–217.
- Winham, Godfrey & Ken Steiglitz 1970. Input Generators for Digital Sound Synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America* 47 (part 2): 665–666.

Tkt Vesa Välimäki (vesa.valimaki@tkk.fi) on audiosignaalin­käsittelyn professori Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänen­käsittelytekniikan laboratoriossa. Hän oli Suomen musiikkite­teellisen seuran puheenjohtaja vuosina 2003–2004 ja on yksi Pythagoras-tutkijakoulun opettajista. Hänen tutkimuksensa liittyy digitaaliseen äänisynteesiin, soittimien mallintamiseen ja musiikkiakustiikkaan.

Antti Huovilainen (ajhuovil@acoustics.hut.fi) tekee diplomityötä Teknillisen korkeakoulun akustiikan ja äänen­käsittelytekniikan laboratoriossa. Hänen kiinnostuksensa kohteita ovat virtuaalialanoginen äänisynteesi ja äänen muokkaus analogisia piirejä mallintamalla.

Virtual nostalgia – Digital subtractive sound synthesis

Digital subtractive synthesis – or virtual analog synthesis, as it is often called – refers to computational methods that imitate the sound production principles used in electronic music synthesizers of the 1960s and 1970s. In practice, digital subtractive synthesis is realized as a computer program. In this paper we discuss digital sound synthesis methods, which create sounds similar to those produced by old analog music synthesizers. First we briefly review the different classes of digital sound synthesis methods, and we consider the placement of virtual analog synthesis within these classes. We also classify digital oscillator algorithms and discuss resonant filter techniques. Furthermore, we introduce new methods to generate the sawtooth waveform and to model the nonlinear Moog lowpass filter. These digital subtractive synthesis techniques enable the production of retro sounds with modern computers.