

SAMETTIKOHINAN EVOLUUTIO

Vesa Välimäki ja Jon Fagerström

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, akustiikan laboratorio
Otakaari 5A, 02150 Espoo
vesa.valimaki@aalto.fi, jon.fagerstrom@aalto.fi

Tiivistelmä

Tämä artikkeli keskittyy samettikohinan uusiin laajennuksiin ja sovelluksiin, joita on julkaistu kansainvälisissä tiedelehdissä ja -konferensseissa. Huoneen impulssivaste voidaan mallintaa samettikohinan avulla kahdella menetelmällä, joista ensimmäisessä impulssivaste jaetaan lyhyiksi eripituisiksi pätkiksi, joita approksimoidaan suodatetuilla samettikohinasekvensseillä. Toinen tapa on uudenlainen rekursiivinen kaikkualgoritmi, jossa useita samettikohinasekvenssejä limitetään keskenään. Samettikohinan avulla lyhyttä äänitettä voidaan myös pidentää loputtomasti. Lyhyt samettikohinasekvenssi sopii äänisignaalien dekorrelointiin, jota tarvitaan pseudostereosignaalin tai ympäröivän äänikentän luomiseen monosignaalista. Dekorrelaattorin taajuusvaste voidaan valkaista optimoimalla impulssien paikat ja korkeudet, jottei se aiheuta väritymää. Kurt James Werner on esitellyt loimusamettikohinan (engl. crushed velvet noise), joka kuulostaa ylipäästösudatetulta. Hideki Kawahara on määritellyt taajuusalueen samettikohinan, joka soveltuu puhesynteesiin ja akustisiin mittauksiin.

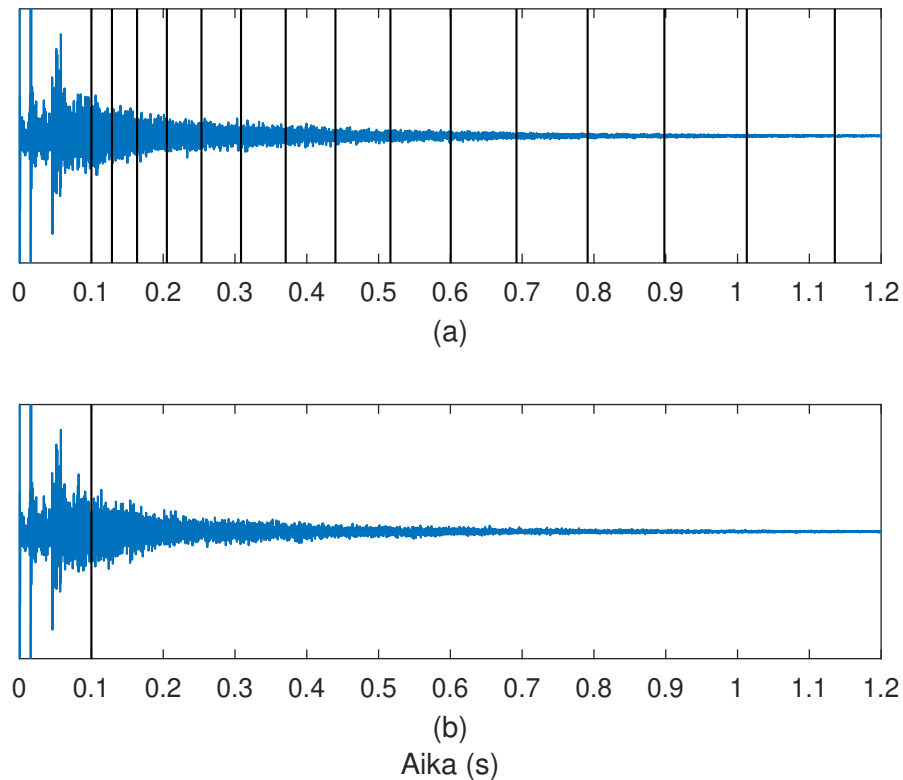
1 JOHDANTO

Samettikohina on Matti Karjalaisen ja Hanna Järveläisen vuonna 2007 esittelemä harva satunnaisasignaali, joka kuulostaa piirteettömältä valkoiselta kohinalta [1, 2]. Tämä artikkeli kertoo samettikohinan uusista sovelluksista ja laajennuksista, joita on julkaistu lähivuosina kansainvälisissä tiedelehdissä ja -konferensseissa.

2 UUDET SAMETTIKOHINAAN PERUSTUVAT KAIKUALGORITMIT

Huonekaiun mallintaminen oli samettikohinan alkuperäinen sovellus, ja ensimmäiset menetelmät perustuivat yhteen takaisinkytkentäsilmutkaan [1, 3]. Uusissa julkaisuissa on esitelty kaksi muutakin ideaa, joista ensimmäisessä impulssivaste jaetaan lyhyiksi eripituisiksi pätkiksi, jotka mallinnetaan suodatettuna samettikohinana [4, 5]. Tämä periaate esitetään kuvassa 1. Etuja ovat laskennallinen tehokkuus ja parametrinen esitys, joka mahdollistaa vasteen muokkauksen, kuten venyttämisen ajassa.

Copyright ©2021 Vesa Välimäki, Jon Fagerström. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



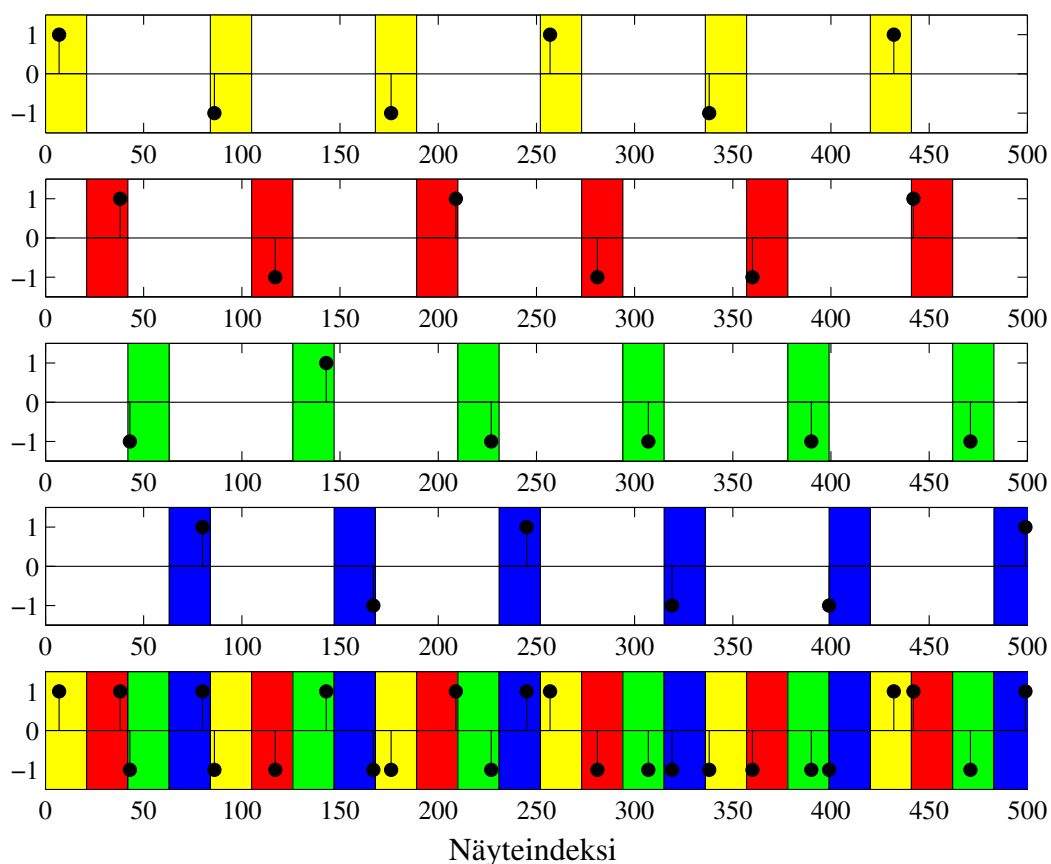
Kuva 1: (a) Konserttisalin impulssivaste jaetaan eripituisiin osiin 0.1 sekunnista alkaen. (b) Mallinnetun impulssivasteessa alkuosa on lainattu alkuperäisestä ja muut osat on korvattu suodatetulla samettikohinalla.

Toinen uusi tapa huonevasteen mallintamiseen samettikohinan avulla on rinnakkainen kaikualgoritmi, jossa useita samettikohinasekvenssejä limitetään keskenään [6]. Tähän käytetään laajennettuja samettikohinasekvenssejä [3], joita toistetaan periodisesti. Jokaiseen sekvenssiin jätetään tyhjiä aikavälejä, joissa ei esiinny impulseja [3]. Kuvassa 2 nähdään esimerkki neljän sekvenssin limittämisestä. Kaikualgoritmissa kaikki rinnakkaiset sekvenssit vaimenevat saman T60-profilin mukaisesti, ja lopputuloksen impulssivaste on samettikohinaa, jossa ei kuulla toisteisuutta eikä karheutta. Algoritmin lohkokaaavio esitetään kuvassa 3. Tämäkin menetelmä on laskennallisesti tehokas ja parametrinen.

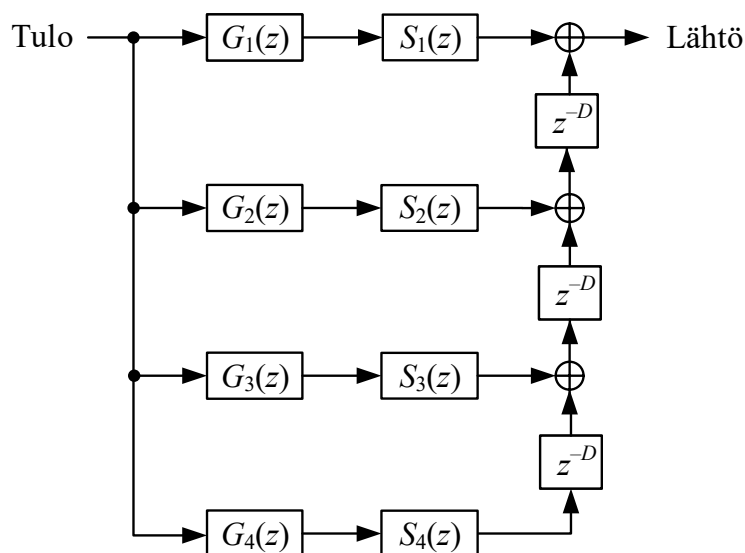
Samettikohinaa on myös hyödynnetty takaisinkytketyn viiveverkon (engl. feedback delay network, FDN) kaikutiheyden parantamiseksi [7]. Kun harvoja samettikohinasuotimia kytkettiin FDN-rakenteen tuloihin ja lähtöihin, algoritmin kaikutiheys kasvoi huomattavasti tavalliseen FDN-algoritmiin verrattuna. Tämän ansiosta riittävä kaikutiheys saavutetaan nyt entistä pienemmällä FDN-verkolla, jolloin tarvittavan laskennan määrä saadaan puolitettua.

3 ÄÄNEN PIDENTÄMINEN SAMETTIKOHINALLA

Samettikohinan avulla ääntä voi jatkaa loputtomiin [8, 9]. Alkuperäisestä äänestä valitaan haluttu kohta, joka voi olla alle sekunnin mittainen. Valitulla signaalilla suodatetaan samettikohinasekvenssiä. Lopputuloksena saatavalla signaalilla on samankaltainen spektri kuin alkuperäisellä signaalilla, mutta se on satunnaisvaiheinen, kuten kohinasignaali.



Kuva 2: Esimerkki neljän laajennetun samettikohinasekvenssin limityksestä [6], jonka lopputulos nähdään alimmassa kuvassa. Impulssit asetellaan satunnaisesti värillisiin aikaväleihin. Valkoiset kohdat sisältävät vain nollanäytteitä, joita ei ole piirretty näkyviin.



Kuva 3: Limitetyn samettikohinakaikualgoritmin lohkokaavio, jossa lohkot $G_k(z)$ ovat kampasuodattimia ja lohkot $S_k(z)$ laajennettuja samettikohinasuodattimia [6]. Viivelinjat z^{-D} auttavat limittämään haarojen lähdöt kuvan 2 periaatteen mukaisesti.

Käytännössä riittää kun signaalista tuotetaan 4 s mittainen pidennetty ääni. Kun sitä toistetaan, kuulijat eivät huomaa toistoa, vaan ääni vaikuttaa jatkuvan loputtomasti.

Samettikohinalla pidennetyssä signaalissa esiintyy spektrivaihteluita, jotka aiheuttavat myös äänekkyuden muutoksia [8, 9]. Tämä saa pidennetyn äänen kuulostamaan hämmästyttävän aidolta eikä lainkaan keinotekoiselta. Vaihtelut voivat silti olla häiritseviä, ja siksi D'Angelo ja Gabrielli esittivät, että äänekkyuden muutoksia voidaan tasoittaa dynaamisen kompressorin avulla [9].

4 DEKORRELOINTI SAMETTIKOHINAN AVULLA

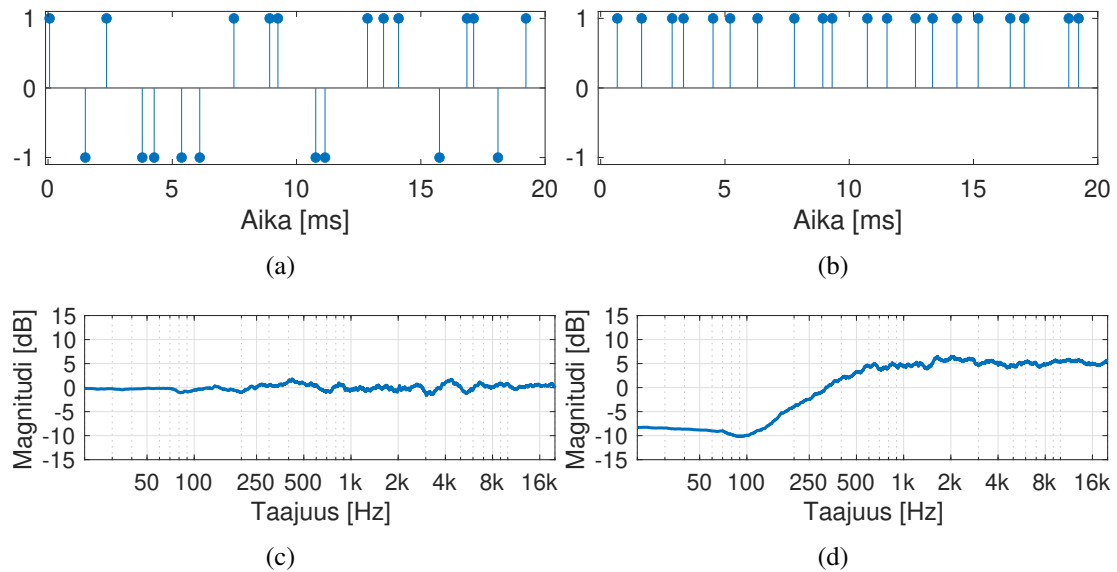
Benoit Alary ym. keksivät, että lyhyt samettikohinasekvenssi sopii äänisignaalin dekorrelointiin, jota tarvitaan pseudostereosignaalin tai monikanavaisen ympäröivän äänikentän luomiseen monosignaalista [10]. Dekorrelointi toteutetaan tuottamalla samettikohinasta lyhyt FIR-suodatin (engl. finite impulse response filter), jonka avulla alkuperäisestä signaalista luodaan versio, joka kuulostaa oleellisesti alkuperäiseltä, mutta joka ei vaiheen muokkauksen ansiosta korreloi alkuperäisen kanssa. Samettikohinadekorrelaattorin vaste voidaan valkaista optimoimalla, jottei se aiheuta ääneen väritystä [11].

5 SAMETTIKOHINAN UUDET LAAJENNUKSET

Tässä kappaleessa esitetään tuoreimpia samettikohinan laajennuksia. Kurt James Werner [12] esitteli tietokonemusiikkia varten loimusamettikohinan (engl. crushed velvet noise), jonka impulssijakauma on epäsymmetrinen. Siinä voi olla esimerkiksi suurempi määrä impulsseista positiivisia kuin negatiivisia. Loimusamettikohina kuulostaa ylipäästösuodatetulta. Kuvassa 4(b) nähdään ääriesimerkki loimusamettikohinan impulssijakaumasta, jossa jokainen impulssi on pakotettu positiiviseksi. Vastaava Bark-tasoitettu spektri, joka on laskettu yhden sekunnin mittaisesta sekvenssistä, nähdään kuvassa 4(d). Spektri muistuttaa bassohyllysuodatettua valkoisen kohinan spektriä. Kuvissa 4(a) ja 4(c) nähdään tavallisen samettikohinan impulssi- ja magnitudivasteet.

Masanori Morise muokkasi samettikohinaa käytettäväksi puhesynteesissä jaksottomien äänteiden tuottamiseen [13]. Perinteinen valkoinen kohina ei takaa etenkään lyhyellä aikavälillä tasavirratonta signaalia. Tasavirraton samettikohina saadaan aikaan varmistamalla, että tuotettu lyhyt sekvenssi sisältää yhtä monta positiivista ja negatiivista impulssia. Näin voidaan varmistaa että sekvenssin energia nollataajuudella (0 Hz) on nolla. Pidempi, myös lyhyellä aikavälillä tasavirraton signaali, saadaan Morisen mukaan ketjuttamalla useita lyhyitä muokattuja sekvenssejä [13].

Hideki Kawahara yhteistyökumppaneineen on määritellyt taajuusalueen samettikohinan [14], joka puolestaan sopii puhesynteesiin [14] ja akustisiin mittauksiin [15, 16]. Sen kuuntelemisesta seuraa jälki-ilmiö, jonka vaikutuksesta kaikki äänet kuulostavat minuuttien ajan siltä kuin ne soitettaisiin flanger-pedaalin kautta [17]. Taajuusalueen samettikohina tuotetaan nimensä mukaisesti diskreetissä taajuusalueessa mukailten tavallisen samettikohinan synteesiä diskreetissä ajassa. Impulssien paikkojen sijaan satunnaistetaan spektripiikkien taajuudet. Sitten vaihetta manipuloidaan näiden keskitaajuuksien kohdalla ikkunointifunktiolla. Lopulta käänteisellä Fourier-muunnoksella saadaan tuotettua aika-alueen sekvenssi.



Kuva 4: (a) Tavallinen samettikohinasekvenssi ja (c) sen Bark-tasoitettu magnitudispektri sekä (b) loimusamettikohina ja (d) sen Bark-tasoitettu magnitudispektri, josta ilmenee pienten taajuuksien vaimentuminen. Molemmat kohinasignaalit ovat 1 s mittaisia, mutta niistä näytetään ensimmäiset 20 ms.

6 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin tieteellisiä uutuuksia, jotka liittyvät suomalaisen harvaan satunnaissignaaliin, samettikohinaan. Alun perin samettikohinaa käytettiin kaikualgoritmeissa, joita kehitetään edelleen. Lisäksi samettikohinaa voidaan käyttää äänisignaalien pidentämiseen ja dekorrelointiin, ja siitä on kehitetty muunnelmia, kuten loimusamettikohina ja taajuusalueen samettikohina.

VIITTEET

- [1] M. Karjalainen ja H. Järveläinen. Reverberation modeling using velvet noise. In *Proceedings of the AES 30th International Conference on Intelligent Audio Environments*, Saariselkä, 2007.
- [2] V. Välimäki, H.-M. Lehtonen ja J. Kleimola. Samettikohina. In *Akustiikkapäivät*, pages 99–104, Oulu, 2013.
- [3] V. Välimäki, H.-M. Lehtonen ja M. Takanen. A perceptual study on velvet noise and its variants at different pulse densities. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 21(7):1481–1488, 2013.
- [4] B. Holm-Rasmussen, H.-M. Lehtonen ja V. Välimäki. A new reverberator based on variable sparsity convolution. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-13)*, pages 344–350, Maynooth, Irlanti, 2013.
- [5] V. Välimäki, B. Holm-Rasmussen, B. Alary ja H.-M. Lehtonen. Late reverberation synthesis using filtered velvet noise. *Applied Sciences*, 7(5), 2017.

- [6] V. Välimäki ja K. Prawda. Late-reverberation synthesis using interleaved velvet-noise sequences. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 29:1149–1160, 2021.
- [7] J. Fagerström, B. Alary, S. J. Schlecht ja V. Välimäki. Velvet-noise feedback delay network. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-20)*, pages 219–226, Wien, Itävalta (etänä), 2020.
- [8] V. Välimäki, J. Rämö ja F. Esqueda. Creating endless sounds. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*, pages 219–226, Aveiro, Portugali, 2018.
- [9] S. D’Angelo ja L. Gabrielli. Efficient signal extrapolation by granulation and convolution with velvet noise. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*, pages 107–112, Aveiro, Portugali, 2018.
- [10] B. Alary, A. Politis ja V. Välimäki. Velvet-noise decorrelator. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)*, pages 405–411, Edinburgh, Yhdistynyt kuningaskunta, 2017.
- [11] S. J. Schlecht, B. Alary, V. Välimäki ja E. A. P. Habets. Optimized velvet-noise decorrelator. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*, pages 87–94, Aveiro, Portugali, 2018.
- [12] K. J. Werner. Generalizations of velvet noise and their use in 1-bit music. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-19)*, Birmingham, Yhdistynyt kuningaskunta, 2019.
- [13] M. Morise. Modification of velvet noise for speech waveform generation by using vocoder-based speech synthesizer. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E102D(3), 2019.
- [14] H. Kawahara, K.-I. Sakakibara, M. Morise, H. Banno, T. Toda ja T. Irino. Frequency domain variants of velvet noise and their application to speech processing and synthesis. In *Proceedings of Interspeech*, pages 2027–2031, Hyderabad, Intia, 2018.
- [15] H. Kawahara, K.-I. Sakakibara, M. Mizumachi, H. Banno, M. Morise ja T. Irino. Frequency domain variant of velvet noise and its application to acoustic measurements. In *Proceedings of the Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, marraskuu 2019.
- [16] H. Kawahara, K. I. Sakakibara, M. Mizumachi, M. Morise ja H. Banno. Simultaneous measurement of time-invariant linear and nonlinear, and random and extra responses using frequency domain variant of velvet noise. In *Proceedings of the Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) Proceedings*, pages 174–183, joulukuu 2020.
- [17] H. Kawahara. Strange aftereffect caused by periodic allocation of a frequency domain variant of velvet noise. In *Proceedings of the Auditory Research Meeting of the Acoustical Society of Japan*, joulukuu 2019.