

SAMETTIKOHINA

Vesa Välimäki¹, Heidi-Maria Lehtonen¹ ja Jari Kleimola²

¹ Aalto-yliopisto, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
PL 13000
00076 AALTO
vesa.valimaki@aalto.fi, heidi-maria.lehtonen@aalto.fi

² Aalto-yliopisto, Mediatekniikan laitos
PL 15500
00076 AALTO
jari.kleimola@aalto.fi

Tiivistelmä

Samettikohina on harva satunnaissignaali, joka koostuu positiivisista ja negatiivisista impulsseista sekä nolista. Kun impulsseja esiintyy keskimäärin riittävän tiheästi, samettikohina kuulostaa valkoiselta kohinalta. Tässä artikkelissa esittelemme kuuntelukoetuloksia, joiden perusteella voidaan sanoa, että kun samettikohinan näytteistä vähintään 5 % on impulsseja (−1 tai +1) ja loput (alle 95 %) nolli, se kuulostaa pehmeämmältä kuin tavanomainen valkoinen kohina, jonka näytearvot on poimittu Gaussin jakaumasta. Kuvaamme samettikohinaa tuottavan algoritmin ja yhden sen muunnelman. Samettikohinasta voidaan tehdä harva digitaalinen myötäkytketty suodatin, joka on laskennallisesti tehokas, koska vain pieni osa kertoimista poikkeaa nolasta eikä siinä tarvita kertolaskuja. Esittelemme muutamia samettikohinaan perustuvia kaikulaiterakenteita, joissa kohinasekvenssistä tehtyä harvaa suodatinta syötetään kampasuodattimella, joka sisältää alipäästösuodattimen.

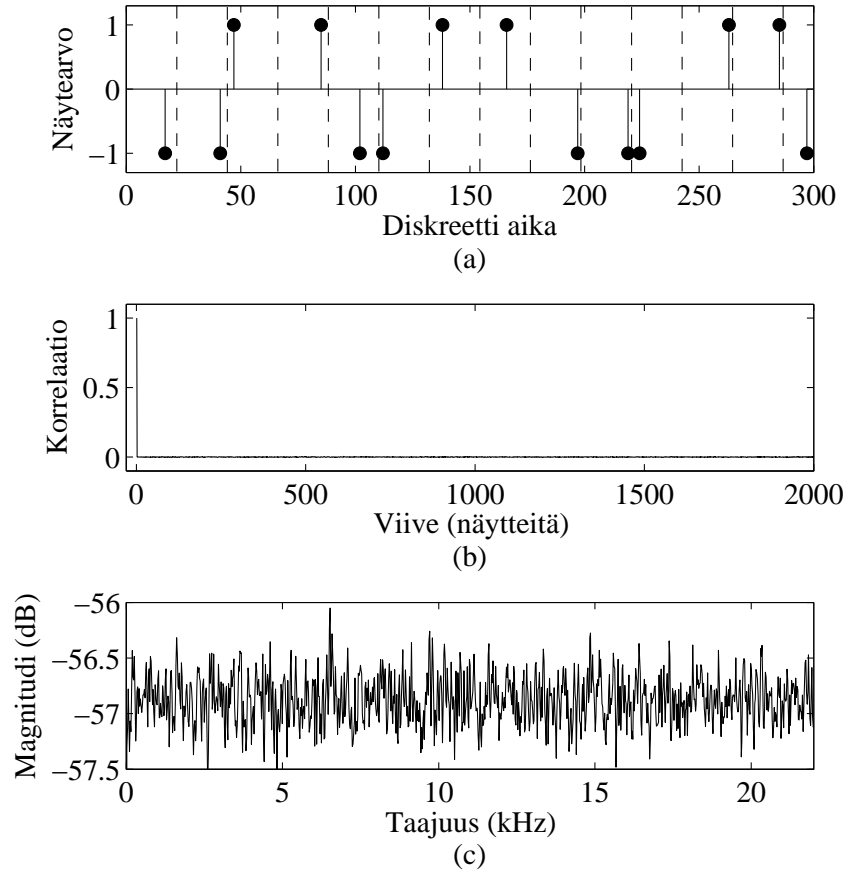
1 JOHDANTO

Matti Karjalainen ja Hanna Järveläinen esittelivät vuonna 2007 harvan kohinasignaalin, joka kuulostaa piirteettömältä, kuten valkoinen kohina [1]. He nimesivät sen *samettikohinaksi*, koska se kuulostaa ”pehmeämmältä” kuin tavallinen valkoinen kohina, jonka näytearvot poimitaan Gaussin jakaumasta. Samettikohina on mielenkiintoinen tutkimusaihe, koska konserttisalien ja muiden tilojen impulssivaste muistuttaa alkua lukuun ottamatta kohinaa [1, 2, 3]. Kun tilan impulssivastetta jäljitellään samettikohinan avulla, saadaan laskennallisesti tehokas algoritmi [1, 4, 5, 6].

2 SAMETTIKOHINAN SYNTEESI

Samettikohina koostuu negatiivisista ja positiivisista impulsseista sekä nolista. Sitä voidaan tuottaa kahden tasajakautuneen satunnaislukujonon avulla. Samettikohinasekvenssin $s_{\text{ovn}}(n)$ impulssien paikat $k_{\text{ovn}}(m)$ arvotaan seuraavasti [7]:

$$k_{\text{ovn}}(m) = \text{round}[mT_d + r_1(m)(T_d - 1)], \quad (1)$$



Kuva 1: (a) Samettikohinasekvenssi, (b) sen normalisoitu autokorrelaatiofunktio ja (c) tehospektri. Ominaisuuudet muistuttavat valkoista kohinaa, vaikka signaali on harva.

missä $\text{round}(\cdot)$ on pyöristysfunktio, $m = 0, 1, 2, \dots$ on pulssilaskuri, $r_1(m)$ on tasajakautunut satunnaislukujono, jonka arvot vaihtelevat nollan ja yhden välillä, T_d on impulssien keskimääräinen etäisyys eli *impulssiväli* ja alaindeksi "ovn" viittaa algoritmin englanninkieliseen nimeen "Original Velvet Noise" [7]. Impulssien etumerkki arvotaan toisen tasajakautuneen satunnaislukujonon $r_2(m)$ avulla seuraavasti:

$$s_{\text{ovn}}(n) = \begin{cases} 2 \text{round}[r_2(m)] - 1, & \text{kun } n = k_{\text{ovn}}(m) \\ 0 & \text{muuten,} \end{cases} \quad (2)$$

missä n on näyteindeksi (diskreetti aika). Näin tuotetussa signaalissa $s_{\text{ovn}}(n)$ esiintyy nollasta poikkeava näyte (-1 tai $+1$) jokaisella välillä T_d . *Impulssitiheys* eli nollasta poikkeavien näytteiden keskimääräinen määrä aikayksikössä on $N_d = f_s / T_d$, kun f_s on näyteenäyttötaajuus. Samettikohinasta tulee binaarista kohinaa, kun impulssiväliksi valitaan $T_d = 1$.

Kuvassa 1 nähdään esimerkki samettikohinasekvenssistä, jonka impulssitiheys N_d on 2000 pulssia sekunnissa (p/s), kun näyteenäyttötaajuus on 44,1 kHz. Kuva 1(a) näyttää vain impulssit (ei nollija), jotka esiintyvät kerran $n = 22$ näytteessä ($T_d = f_s / N_d = 44100 \text{ Hz} / 2000 \text{ 1/s} = 22,05$). Kuvassa 1(b) esitetään samettikohinan normalisoitu harhainen autokorrelaatiofunktio, joka on laskettu 10 s signaalista. Se muistuttaa valkoisen kohinan autokorrelaatiofunktioita: sen arvo on 1,0 viiveellä 0 ja erittäin pieni (alle 0,01) muilla viiveillä. Kuvassa 1(c) näytetään samettikohinan tehospektriestimaatti, joka on laskettu 10 s sig-

naalista. Spektri on lähes vakio kaikilla taajuuksilla eli myös tässä mielessä samettikohina muistuttaa valkoista kohinaa.

Samettikohinan impulssitiheys vaikuttaa huomattavasti sen äänekkyyteen ja karheuteen. Samettikohinan äänekkyyden on verrannollinen impulssitiheyden neliöjuureen. Siksi tiheämpi samettikohinasignaali $s_2(n)$ voidaan skaalata kuulostamaan yhtä voimakkaalta kuin harvempi samettikohinasignaali $s_1(n)$ kertomalla tiheämmän signaalin $s_2(n)$ näytteet kertoimella

$$g = \sqrt{N_{d,1}} / \sqrt{N_{d,2}}, \quad (3)$$

missä $N_{d,1}$ on signaalin $s_1(n)$ impulssitiheys ja $N_{d,2}$ on sekvenssin $s_2(n)$ impulssitiheys.

Kun samettikohina on erittäin harvaa, se kuulostaa karhealta. Samettikohinan psykoakustinen *pehmeys*, karheuden vastakohta, on määritetty kuuntelukokein [1, 7]. Kuuntelukokeissa samettikohinaa verrattiin tavalliseen valkoiseen kohinaan, jossa jokainen näyte on riippumaton ja poimittu Gaussin jakaumasta. Karjalainen ja Järveläinen totesivat, että samettikohina kuulostaa yhtä pehmeältä kuin valkoinen kohina, kun sen impulssitiheys on 1500 p/s tai 3000 p/s [1]. Toistimme kokeen ja päädyimme siihen, että samettikohina kuulostaa pehmeämmältä kuin valkoinen kohina, kun impulssitiheys on 2000 p/s tai suurempi [7]. Nollasta poikkeavia näytearvoja on vain 5 %, kun impulssitiheys on 2000 p/s, ja loput 95 % näytteistä on nollia. Taulukossa 1 annetaan kuuntelukoetulosten keskiarvot asteikolla $-3 \dots +3$, missä 0 vastaa ”yhtä pehmeää”, -1 ”hieman karheampaa”, -2 ”karheampaa”, -3 ”paljon karheampaa”, $+1$ ”hieman pehmeämpää”, $+2$ ”pehmeämpää” ja $+3$ ”paljon pehmeämpää” kuin valkoinen kohina, jonka näytearvot on poimittu Gaussin jakaumasta. Taulukosta 1 nähdään, että koehenkilöt eivät kuulleet tapausten 2000 p/s ja 4000 p/s välillä eroa, mutta 8000 p/s kuulosti pehmeämmältä kuin muut kohinasignaalit.

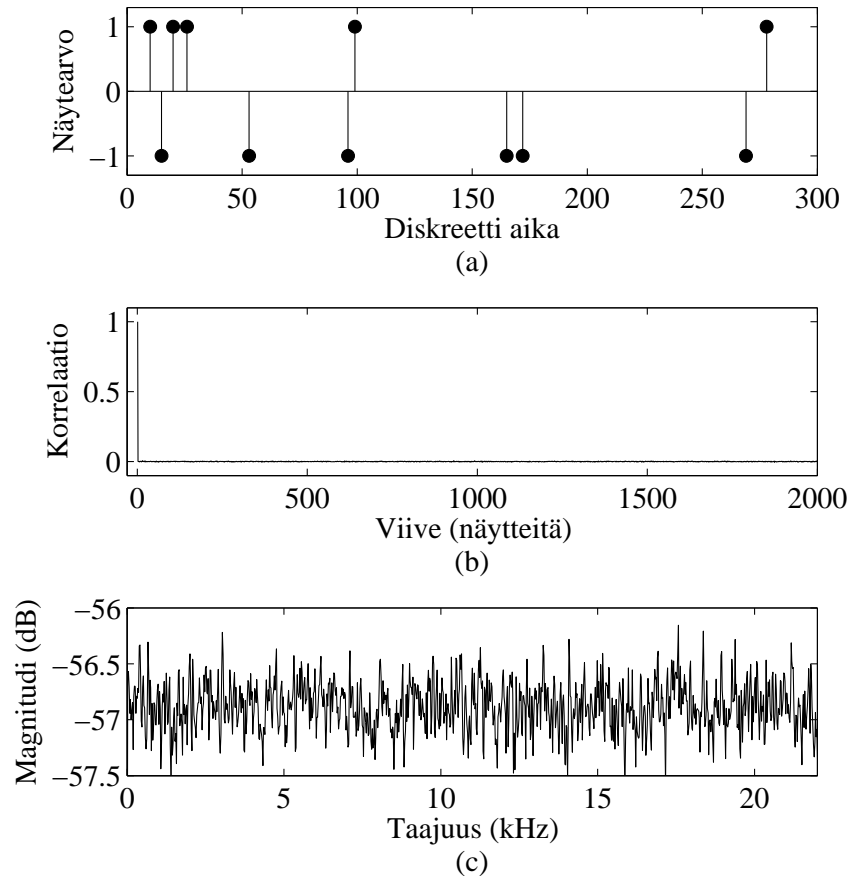
Vertailun vuoksi kuuntelukokeisiin otettiin mukaan toinen harva satunnaissignaali, jota ovat ehdottaneet Rubak ja Johansen [3] ja jota kutsumme *täysin satunnaiseksi kohinaksi* (TRN, Totally Random Noise). Sitä voidaan tuottaa seuraavasti [7]:

$$s_{\text{trn}}(n) = \text{round} \left\{ \left(\frac{T_d}{T_d - 1} \right) \left[r(n) - \frac{1}{2} \right] \right\}, \quad (4)$$

missä $r(n)$ on satunnaislukujono, jonka arvot jakautuvat tasaisesti välille $(0, 1)$. Esimerkki TRN-kohinasta esitetään kuvassa 2. TRN-näytejonossa nollasta poikkeavia arvoja voi esiintyä periaatteessa millä tahansa hetkellä, koska TRN-sekvenssiä ei jaeta impulssiväleihin, kuten samettikohina. Kuvasta 2(a) nähdään, että impulssit voivat nyt sattua lähemmäksi tai niiden väliin voi jäädä pitkiäkin välejä. Keskimäärin impulssitiheys on kuitenkin $N_d = f_s / T_d$, kun kaavaa (4) sovellettaessa on valittu T_d . Kuvien 2(b) ja 2(c) autokorrelaatiofunktio ja tehospektri muistuttavat valkoista kohinaa. Taulukosta 1 nähdään, että TRN-kohina ei saavuta valkoisen kohinan pehmeyttä, kun impulssitiheyttä kasvatetaan [7].

Taulukko 1: *Samettikohinan ja täysin satunnaisen harvan kohinan pehmeys verrattuna tavalliseen valkoiseen kohinaan [7]. Tavallista kohinaa pehmeämmät arviot on lihavoitu.*

Impulssitiheys	500 p/s	1000 p/s	2000 p/s	4000 p/s	8000 p/s
Samettikohina	-2,8	-2,0	0,4	0,4	1,5
Täysin satunnainen kohina	-3,3	-2,8	-2,4	-2,1	-0,9



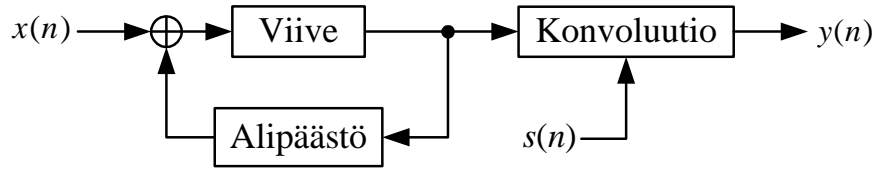
Kuva 2: (a) Täysin satunnainen kohinasekvenssi (TRN), (b) sen normalisoitu autokorrelaatiofunktio ja (c) tehospektri. Nämä ominaisuudet näyttävät hyvin samankaltaisilta kuin samettikohinalla kuvassa 1, mutta täysin satunnainen kohina kuulostaa aivan erilaiselta.

3 SAMETTIKOHINAAN PERUSTUVAT KAIKUALGORITMIT

Samettikohinan avulla voidaan kehittää kahdenlaisia kaikualgoritmeja: harvaan konvoluutioon ja rekursiivisiin rakenteisiin perustuvia. Karjalainen ja Järveläinen esittelivät molemmat tekniikat [1], mutta niitä on mahdollista kehitellä monin tavoin.

Moorer [2] esitti, että huoneen impulssivasteen loppuosa muistuttaa eksponentiaalisesti vaimenevaa valkoista kohinaa. Vaikka vaimenevan kohinan tuottaminen onkin helppoa, tämän idean suora hyödyntäminen kaikualgoritmeissa on ollut vaikeaa, koska konvoluution laskeminen kohinasekvenssin ja äänisignaalin välillä on raskasta. Samettikohina muuttaa asian, koska suurin osa sen näytearvoista on nollija ja kertolaskuja nolllalla ei tarvitse laskea konvoluutiossa. Lisäksi konvoluution laskenta loppujenkin samettikohinan näytearvojen (-1 tai $+1$) kanssa voidaan toteuttaa yhteen- ja vähennyslaskuina, joten samettikohinakonvoluutiossa ei tarvita lainkaan kertolaskuja.

Esimerkiksi äänisignaalin suodattaminen 1 sekunnin pituisella samettikohinasignaalinalla, jonka impulssitiheys on 2205 p/s näytetaajuudella 44100 Hz (5 % nolllasta poikkeavia arvoja), vaatii vain 2204 yhteenlaskua (noin puolet niistä vähennyslaskuja) per konvoluutio. Sekunnin mittainen tavallinen konvoluutio sen sijaan sisältää 44100 kerto- ja 44099 yhteenlaskua eli yhteensä 88199 operaatiota. Tämä on 40-kertainen määrä laskentaa samettikohinakonvoluutioon verrattuna.



Kuva 3: Rekursiivisen samettikohinakaikualgoritmin perusrakenne, jossa tulosignaali $x(n)$ käsitellään ensin alipäästö-kampasuodattimella ja konvoloidaan lopuksi lyhyen samettikohinasekvenssin $s(n)$ kanssa [1, 4, 6].

Karjalainen ja Järveläinen [1] ehdottivat, että osa huoneen impulssivasteesta voidaan korvata suodatetulla samettikohinalla, jonka verhoikäyrä säädetään vastaamaan mitattua impulssivastetta. Tämän ehdotuksen pohjalta voidaan kehittää tehokas kaikualgoritmi, jolla voidaan korvata pitkä konvoluutio.

Toinen tapa hyödyntää samettikohinaa on valita lyhyempi samettikohinasekvenssi kuin konvoluutiokaiussa ja kytkeä sen kanssa peräkkäin kampasuodatin, jonka takaisinkyntensäilmukassa on alipäästösuodatin [1, 4, 6]. Tämä perusrakenne esitetään kuvassa 3. Alipäästö-kampasuodattimen tarkoitus on tuottaa impulssivasteeseen vaimeneva pulssijono. Jokainen näistä pulsseista suodattuu samettikohinasekvenssillä, jonka pituus on sama kuin kampasuodattimen viive, ja näin synteettinen vaste täyttyy suodatetusta vaimenevasta samettikohinasta, vaikka konvoluutio samettikohinan kanssa onkin lyhyt. Jos kuvan 3 samettikohinasekvenssi on lisäksi erittäin harva, konvoluution laskentakuorma on vähäinen. Myös kampasuodattimen laskentakuorma on erittäin pieni.

Vaikka kuvan 3 signaalinkäsittelyjärjestelmä onkin laskennallisesti erittäin tehokas, se ei ole täysin ongelmaton, koska kohinan toistuminen kampasuodattimen viiveen välein kuuluu selvästi [1, 4, 6]. Ilmiö muistuttaa tärykaikua ja tulee parhaiten esiin transienttisignaalien, kuten rummutuksen avulla. Siksi kuvan 3 rakenteesta on kokeiltu erilaisia muunnelmia. Yksi mahdollisuus on vaihtaa samettikohinasekvenssi lyhyin aikaväleihin [1, 4]. Silloin tärykaikua muistuttava häiriö vaimenee eikä kuulu transienttisignaalien yhteydessä. Kuitenkin tästä seuraa toisenlainen ongelma, kun impulssivasteen muuttuminen kuuluu modulaationa erityisesti kaiutettaessa jatkuvia ääniä, kuten jousisoittimien tai urkujen pitkiä sointuja.

Toistaiseksi lupaavin julkaistu ratkaisu on käyttää kuvan 3 järjestelmässä samettikohinasekvenssiä, joka koostuu kahden tai useamman samettikohinasignaalin yhdistelmästä [1, 4, 6]. Yhtä sekvenssiä häivytetään vähitellen kun taas toista vahvistetaan, ja näin saadaan hitaasti muuttuva samettikohinasekvenssi, jossa molemmat häiriötyypit (tärykaiku, modulaatio) vaimenevat [4]. Oksanen *et al.* ovat ehdottaneet että muuttuva satunnaissekvenssi voidaan lisäksi yhdistää samanlaisena toistuvaan samettikohinasekvenssiin [6].

4 YHTEENVETO JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Samettikohina muuttaa käsityksemme akustisesta valkoisesta kohinasta. Sen ei tarvitsekaan koostua peräkkäisistä satunnaisista ja riippumattomista näytteistä, kuten aiemmin on ajateltu, vaan siinä voi esiintyä satunnaisesti sopivan harvakseltaan impulsseja. Tällainen signaali, jota kutsutaan samettikohinaksi, on spektriltään tasainen ja kuulostaa piirteettömältä, kuten normaalijakautuneista satunnaisluvuista koostuva valkoinen kohina. Kun samettikohinan impulssitiheys on vähintään 2000 pulssia sekunnissa, se kuulostaa pehmeämmältä kuin tavallinen valkoinen kohina. Tätä huomiota voidaan hyödyntää akusti-

sisä kohinageneraattoreissa, joita tarvitaan äänisynteesissä ja peittoäänten tuottamisessa.

Huoneen tai salin impulssivastetta voidaan approksimoida suodatetulla samettikohinalla, mikä on paljon tehokkaampi tapa kuin tavallinen konvoluutiokaikualgoritmi. Kun lyhyttä samettikohinasekvenssiä hyödynnetään rekursiivisessa kaikualgoritmissa, haasteeksi jää tärykaikua muistuttava häiriö, joka kuullaan selvästi kun tulosignaali sisältää transientteja, kuten rummutuksessa. Tärykaikua voidaan vaimentaa muuttamalla kohinasekvenssiä ajoittain, jolloin se ei toistu täsmälleen samanlaisena. Tällöin signaaliin muodostuu toisenlainen häiriö, modulaatio, joka havaitaan helposti staattisissa signaaleissa, kuten jousiorkesterin pitkissä äänissä. Kahta tai useampaa samettikohinasekvenssiä hitaasti vaihtamalla ja yhdistämällä saadaan algoritmi, jossa molemmat häiriötyypit vaimenevat.

Samettikohina on lupaava uusi menetelmä huonekaiun jäljittelyyn. Samettikohinalla voitaneen korvata kampsuodattimet ja raskaat konvoluutiot jälkikaiunta-algoritmeissa.

KIIITOKSET

Heidi-Maria Lehtosen työtä rahoittaa Suomen Kulttuurirahasto. Kiitokset Marko Takaselle hänen avustaan kuuntelukokeissa, joiden tulokset julkaistiin kokonaisuudessaan muualla [7], sekä Bo Holm-Rasmussenille, joka työstiä diplomityönään uutta samettikohina-algoritmia konserttisalin impulssivasteen mallintamiseen.

VIITTEET

- [1] KARJALAINEN M & JÄRVELÄINEN H, Reverberation modeling using velvet noise, in *Proceedings of the Audio Engineering Society 30th International Conference on Intelligent Audio Environments*, Saariselkä, maaliskuu 2007.
- [2] MOORER J, About this reverberation business, *Computer Music Journal* **3**(1979) 2, 13–28.
- [3] RUBAK P & JOHANSEN L G, Artificial reverberation based on a pseudo-random impulse response, in *Proceedings of the Audio Engineering Society 104th Convention*, artikkeli nro 4725, Amsterdam, Alankomaat, toukokuu 1998.
- [4] LEE K-S, ABEL J S, VÄLIMÄKI V, STILSON T & BERNERS D P, The switched convolution reverberator, *Journal of the Audio Engineering Society* **60**(2012) 4, 227–236. Ääniesimerkit verkossa osoitteessa: <https://ccrma.stanford.edu/~keunsup/screverb.html>.
- [5] VÄLIMÄKI V, PARKER J D, SAVIOJA L, SMITH J O & ABEL J S, Fifty years of artificial reverberation, *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing* **20**(2012) 5, 1421–1448.
- [6] OKSANEN S, PARKER J, POLITIS A & VÄLIMÄKI V, A directional diffuse reverberation model for excavated tunnels in rock, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vancouver, Kanada, toukokuu 2013.
- [7] VÄLIMÄKI V, LEHTONEN H-M & TAKANEN M, A perceptual study on velvet noise and its variants at different pulse densities, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* **21**(2013) 7, 1481–1488. Ääniesimerkit verkossa osoitteessa <http://www.acoustics.hut.fi/publications/papers/ieee-taslp-2013-velvet/>.