

MUSIIKKIÄÄNITTEIDEN PATINOINTI SIGNAALINKÄSITTELYN AVULLA

Vesa Välimäki (1), Sira González (1), Jukka Parviainen (2) ja Ossi Kimmelma (3)

(1) Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, PL 3000, 02015 TKK, Espoo, vesa.valimaki@tkk.fi

(2) Teknillinen korkeakoulu, Informaatiotekniikan laboratorio, Espoo, parvi@james.hut.fi

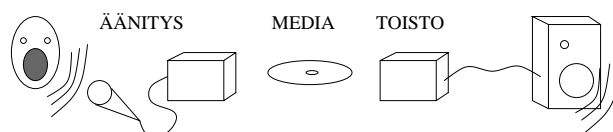
(3) Teknillinen korkeakoulu, Micronova, Espoo, ossi.kimmelma@tkk.fi

1 JOHDANTO

Tietokoneiden ja äänenkäsittelytekniikan kehittyminen ovat tehneet mahdolliseksi vanhojen äänitteiden laadun parantamisen eli restauroimisen [1]. Esimerkiksi vanhoilla äänilevyillä esiintyvää suhinaa ja napsahduksia voidaan nykyisin vaimentaa merkittävästi tai jopa täysin kuulumattomiin. Digitaalinen restaurointi mahdollistaa vanhojen äänitteiden julkaisemisen CD-levyllä tai esittämisen radiossa ja televisiossa.

Tässä artikkelissa esittelemme äänenkäsittelymenetelmiä, jotka mahdollistavat käänteisen toimenpiteen – uuden digitaaliäänitteen patinoinnin vanhanaikaisen kuuloiseksi [2, 3]. Näillä patinointimenetelmillä hyvälaatuisesta hifi-äänitteestä voidaan tehdä äänenlaadultaan huononnettu lo-fi-kopio (engl. *low fidelity*). Äänisignaalien huonontaminen on viime aikoina kiinnostanut tutkijoita useista eri syistä. Vanhojen äänitteiden häiriöitä voidaan aiheuttaa hyvälaatuisen musiikkisignaaliin, jotta voidaan testata restaurointitekniikoita, ks. esim. [4] ja [5]. Nick Zacharov on kertonut Nokian audiojärjestelmien virtuaaliprototyypointihankkeesta, jossa simuloidaan matkapuhelimen ääntä, kun otetaan huomioon puheen koodaus ja kaikki muut äänenlaatuun vaikuttavat tekijät [6]. Läheisin aiempi työ on ilmainen ohjelma nimeltä iZotope Vinyl, joka simuloi LP-levyille tyypillisiä häiriöitä [7]. Julkisesti ei ole tiedossa käytetäänkö siinä samanlaisia signaalinkäsittelymenetelmiä kuin tässä tutkimuksessa.

Musiikkiäänitteen patinointi vaatii vanhojen äänitystekniikoiden, tallenteiden ja niissä esiintyvien häiriöiden syntymekanismien ymmärrystä, ks. kuva 1. Esittelemme lyhyesti äänitteiden historiaa, kuten vuosien 1877 ja 1925 välillä käytössä ollutta akustis-mekaanista tallennusta, vuosina 1925-1950 yleisiä savikiekkoja ja niiden jälkeen 1990-luvulle asti käytössä olleita LP-levyjä. Mainitsemme mm. mekaanisen ja sähköisen kohinan sekä äänilevyjen kulumisen, pölyisyyden, naarmujen ja vääntymisen aiheuttamien häiriöiden tuottamisen digitaalisesti. Lisäksi digitaalisen suodatuksen avulla voidaan matkia vanhan äänityslaitteiston, tallenteen tai äänentoistolaitteen rajoittunutta basso- ja diskanttitoistoa ja muita taajuusvasteen virheitä.



Kuva 1. Äänitetty musiikki voidaan tallettaa esimerkiksi levyille, jolta musiikki toistetaan äänentoistojärjestelmän avulla. Äänityksessä, tallennuksessa ja toistossa voi esiintyä teknisiä puutteita, jotka heikentävät äänenlaatua.



Kuva 2. Edison-lieriöiden soittoon tarkoitettu fonografi (Helsingin yliopiston musiikkikirjaston kokoelma).

2 ÄÄNITTEIDEN HISTORIAA

Ääniteteollisuudessa on vaikuttanut taloudellis-tekninen kilpailu, jossa toiset tekniset ratkaisut ovat unohtuneet kalliin hinnan tai väärän ajoituksen takia [8, 9]. Thomas Alva Edison toteutti vuonna 1877 ensimmäisen ihmisen ääntä tallentavan ja toistavan laitteen, ks. kuva 2. Hänen kehittämänsä fonografi käytti lieriömäistä tallennusvälinettä. Emil Berliner kehitti litteitä levyjä käyttävän gramofonin 1880-luvulla. Gramofonit syrjäyttivät fonografit viimeistään 1910-luvulla, vaikka fonografeja käytettiin sanelulaitteina vielä 1950-luvulla. Gramofonilevyt, joita usein kutsutaan savikiekoiksi, pyörivät 78 kierrosta minuutissa ja olivat puoleltaan noin 3 minuuttia pitkiä.

Aluksi rakennettiin täysin mekaanisia laitteita, joiden tärkeimmät osat olivat jousimoottori-koneisto, neula ja äänirasia sekä ääntä vahvistava torvi. Äänitystilanne poikkesi suuresti nykyisestä: koska levyn kaivertamiseen tarvittavaa energiaa saatiin äänestä akustisesti, koko orkesteri artistia myöten oli samassa pienessä tilassa ja laulusolisti huusi äänitystorveen. Toiset soittimet eivät kuuluneet ilman erityisjärjestelyjä. Äänitystä ei voinut korjata jälkikäteen, ja ennen kopiointitekniikoita jokainen äänite oli ainutkertainen. Silti äänitteet loivat tähtiä, kuten oopperalauluja Enrico Caruson. Alkuajan akustisille äänityksille oli tyypillistä hyvin kapea taajuuskaista ja heikko äänenlaatu. Esimerkiksi lieriön pyörimisnopeus vaihteli äänitteestä toiseen.

Sähköisen äänentallennuksen aikakausi alkoi 1920-luvulla, kun käyttöön saatiin mikrofonit ja putkivahvistimet (engl. *vacuum tube*). Tämä merkitsi huomattavaa parannusta äänenlaadussa, sillä esiintyjän ei tarvinnut käyttää kaikkia voimiaan voimakkaan äänen tuottamiseen. Muutos toi mukanaan äänielokuvan, radion ja television. Gramofonilevyjä soitettiin neulalla, joka oli kiinnitetty massiiviseen äänirasiaan, ks. kuva 3. Äänitteiden taajuuskaista oli edelleen rajoitettu noin 3 kHz:iin.



Kuva 3. Gramofonin jyrävä neula soittaa savikiekkoa (Helsingin yliopiston musiikkikirjaston kokoelma).

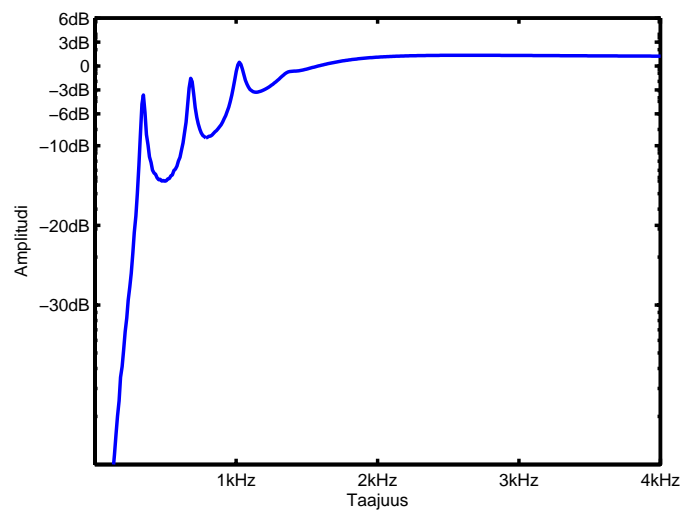
Magneettinen ääninauha oli keksitty 1900-luvun alussa, mutta se tuli laajaan käyttöön vasta 2. maailmansodan jälkeen. Nauhat mahdollistivat äänitteiden editoinnin jälkikäteen. Ääninauha tuli kotikäyttöön 1950-luvulla avokelanauhureissa ja 1960-luvulla C-kaseteissa. Levyjen pelastukseksi tulivat vinyylimuoviset LP-levyt (engl. *long play*), joihin mahtui moninkertainen määrä musiikkia savikiekkoihin verrattuna. LP-levyjen kierrosnopeudeksi tuli 33 rpm (kierrosta minuutissa) ja single-levyille 45 rpm. Stereoäänitys ja -toisto otettiin käyttöön 1950-luvulta lähtien, mikä mahdollisti alkeellisen tilavaikutelman. Moniraitanauhoitukset vapauttivat artistit ja orkesterit hiomaan tuotoksiaan erikseen.

Digitaalitekniikka on monipuolistanut äänitys- ja äänentoistotekniikkaa. Nykyaikaisella kotiteatterijärjestelmällä pyritään saamaan aikaan autenttinen äänimaailma. Ääntä siirretään digitaalisessa muodossa niin CD-levyillä (engl. *Compact Disc*), joka esiteltiin vuonna 1982, kuin vaikkapa kännyköiden välillä. CD-levyjen myynti ylitti LP-levyt 1990-luvulla. Tietokoneiden ja Internetin kehitys on lisännyt erilaisten digitaalisten laitteiden ja sovellusten määrää myös äänitetekniikassa. Fyysiset levyt ovat yhä edelleen alttiita vioittumiselle ja likaantumiselle. Laitteistojen ja tekniikoiden elinikä on lyhentynyt, ja esimerkiksi kotitietokoneella poltettujen CD-ROM-levyjen säilyvyydestä ei ole todisteita.

3 PATINOINTIMENETELMÄT

Seuraavassa esittelemme menetelmiä äänenlaadun huonontamiseen. Menetelmien avulla voidaan rakentaa eri asetuksilla äänenhuononnusketju, jonka lopputuloksena voidaan jäljitellä jonkin aikakauden äänitettä. Huononnusketjun tulee ottaa huomioon niin kuvitteellinen äänitystilanne, äänitemediassa itsessään olevat tai ajan mukana syntyvät viat kuin äänentoiston olosuhteet.

Säröä syntyy äänentoistoketjussa, kun jokin ketjun komponenteista ei ole lineaarinen. Epälineaarisuus voi olla seurausta komponentin yleisestä epälineaarisuudesta tai väärästä signaalitasosta. Tyypillistä on, että komponentti vahvistusketjussa ei pysty toistamaan signaalia lineaarisesti, jos tulosignaali on liian voimakas. Tämän seurauksena signaali leikkautuu. Tätä leikkautumista on mallinnettu arkustangentti-funktiolla, joka tasoittaa äänisignaalin aalto-
muodon huippuja.



Kuva 4. Kartiotorven väritymää matkiva digitaalisen suodattimen amplitudivaste eli vahvistus taajuuden funktiona.

Äänite	Taajuuskaista	Dynamiikka
Savikiekko	200 Hz – 3 kHz	18 dB
LP	30 Hz – 15 kHz	65 dB
CD	20 Hz – 20 kHz	96 dB

Taulukko 1. Arvioita eri äänitetyyppien taajuuskaistan ja dynamiikan laajuudesta [10]. Savikiekkon suhteen arviot perustuvat varhaisiin akustisiin äänitteisiin ja LP-levyn suhteen 1980-luvulla saavutettuun huipputasoon.

Ihminen aistii ääniä noin 20 Hz ja 20 kHz taajuuksien välillä. Näin laajaan taajuuskaistaan eivät monet äänitteet yllä. Taulukossa 1 esitetään arvioita eri äänitetyyppien taajuuskaistan laajuudelle. Kun signaali esimerkiksi kaistanpäästösuodatetaan vaimentamalla alle 200 Hz ja yli 3 kHz taajuudet, sen taajuussisältö vastaa suurin piirtein savikiekkoäänitettä.

Savikiekkon toisto on yleensä huomattavan väritynyt varsinkin matalilla taajuuksilla gramofonin kartiotorven takia. Teoriassa äärellisen kartiotorven taajuusvaste voidaan johtaa Salmon-torven erillistapauksena. Tällaiseen teoreettiseen arvioon sovitettu digitaalisen suodattimen vaste on piirretty kuvaan 4. Kun signaali ajetaan tämän suodattimen läpi, siinä kuullaan selvä väritymä voimakkaiden resonanssien ansiosta, jotka erottuvat kuvassa alle 1000 Hz taajuuksilla.

Vanhojen äänitteiden kohinataso vaihtelee huomattavasti. Eri äänitetyyppien dynamiikkaa, ks. taulukko 1, voidaan jäljitellä lisäämällä signaaliin valkoista tai värillistä kohinaa. Valkoinen kohina tarkoittaa satunnaista signaalia eli satunnaislukuputusta. Sen spektri on tasainen koko taajuuskaistalla. Kohinaa voidaan muokata suodattamalla. On myös huomattava, että rahinaa lisättäessä kohinataso nousee eli dynamiikka supistuu.

Huojunnalla tarkoitetaan jaksollista muutosta, jossa taajuus vaihtelee. Syynä voi olla se, että äänilevyn reikä ei ole keskellä vaan hieman sivussa tai että levy on vääntynyt, jolloin neula ei kulje ympyräraitaa. Huojuntaa ilmenee myös nauhoissa, joissa se voi olla nopeataajuisempaa

värinää (engl. jitter). Huononnustoteutuksessa käytetään fysikaalisia parametrejä, kuten levyn kierrosnopeutta, läpimittaa ja poikkeamaa keskipisteestä, joiden geometriaan perustuen laskeaan neulan lukunopeus eri kohdissa kierrosta. Äänitiedosto näytteistetään uudelleen vaihtuvalla lukunopeudella käyttäen interpolointia.

Naarmut levyn pinnassa tuottavat jaksollisen lyhytkestoisen virheen. Naarmun kohdalla lukura katkeaa ja lukuvarsi saattaa jäädä pompun jälkeen lyhyeksi ajaksi värähtelemään aiheuttavan kuultavan napsahduksen. Naarmun suuruus vaikuttaa pompun pituuteen ja voimakkuuteen. Pahimmassa tapauksessa neula hyppää uudestaan samalle uralle eli ”jää jumiin”.

Ritinällä tarkoitetaan lyhyitä lähes jatkuvia häiriöitä. Ilmiön taustalla on levyn pintaan tarttunut pölyä ja muita pieniä hiukkasia, jotka jakautuvat tasaisesti levyn pinnalle. Rahina eli pintakohina (engl. *surface noise*) on naarmuja satunnaisempi, mutta ritinää voimakkaampi ääni, joka syntyy yleensä kulutuksesta. Toteutuksessamme käytetään kuluneelta LP-levyltä nauhoitettua autenttista rahinaa. Synteettistä rahinaa voidaan myös tuottaa laskennallisesti. Ritinää voidaan mallintaa lyhyillä satunnaisilla purskeilla, joiden määrää voidaan säätää.

Edison-lieriöt, savikiekot ja vanhat vinyylilevyt sisältävät monoäänitteen. Useimmat modernit äänitteet ovat kaksikanavaisia eli stereoäänitteitä. Ne voidaan muuntaa monoäänitteiksi yhdistämällä molemmat kanavat yhteen.

Vanhoissa äänitteissä hiljaiset äänet voivat kadota kuulumattomiin. Ilmiö voidaan mallintaa vähentämällä (nollaamalla) digitaalisen signaalin kvantisointitasoja eli poistamalla hiljaisimmat äänet. Tasojen vähentäminen johtaa myös kohinan lisääntymiseen. Jotkut häiriöt voivat aiheuttaa poikkeuksellisen suuria näytearvoja signaaliin. Jos arvot skaalataan maksimin suhteen, hyötysignaali suhteellisesti heikkenee ja kohina lisääntyy.

4 ESIMERKKEJÄ PATINOINNISTA

Esittelemme lyhyesti kuinka edellä mainittuja menetelmiä käyttäen voidaan käsitellä uutta äänitettä ja muokata se kuulostamaan siltä kuin se olisi vuosikymmeniä vanha. 1800- ja 1900-lukujen vaihteen fonografiäänitteiden laatua voidaan jäljitellä muuttamalla äänite ensin monoksi, lisäämällä huomattavasti säröä, nollaamalla alimmat kvantisointitasot, lisäämällä kohinaa (esim. niin runsaasti, että SNR eli signaali-kohinasuhde on 13 dB), vaimentamalla basso- ja diskanttiääniä suodattimella (päästökaista 400 – 1600 Hz), lisäämällä ritinää ja napsumista sekä aiheuttamalla keskitaajuuksille resonansseja kartiotorvisuodattimella.

1940-luvun gramofonilevyn laatua voidaan simuloida muuttamalla äänite monoksi, aiheuttamalla huojuntaa, lisäämällä kohinaa (esim. SNR = 18 dB), suodattamalla (200 Hz – 3000 Hz), lisäämällä rahinaa, naarmuista aiheutuvia napsuja, ritinää ja aiheuttamalla keskitaajuuksille resonansseja kartiotorvisuodattimella. Saavutettu äänenlaatu on huomattavasti parempi kuin fonografiäänitteissä, koska taajuuskaista on laajempi ja kohinaa ja säröä on vähemmän.

1960-luvun lopun LP-levy voi sisältää stereoäänitteen. Kulumista voidaan jäljitellä toistamalla tiettyä äänitiedoston kohtaa muutamaan kertaan aivan kuin levy olisi jäänyt pyörimään paikalleen ennen kuin neulaa tönäistään ja musiikki jatkuu. Muut soveltuvat huononnustointimenpiteet ovat kohinan lisäys (SNR = 65 dB), suodatus (30 Hz – 15 kHz), rahinan, ritinän ja naarmujen lisääminen.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin äänenlaadun tahallista heikentämistä tavoilla, jotka muistuttavat vanhoja äänitteitä. Tekemistämme patinointikokeiluista käy ilmi, että joistain moderneista äänitteistä on mahdotonta tehdä aidosti vanhanaikaisen kuuloisia, vaikka tekniset virheet toteutetaan oikeaoppisesti. Pääsyy tähän on studiotekniikan, kuten moniraitaäänitys- ja miksaustekniikoiden sekä kompressoinnin, kehittyminen, minkä vuoksi materiaali kuulostaa häiriöidenkin seasta modernilta. Muita syitä voivat olla musiikin tyylien, laulujen sanoituksen ja äänentoistolaitteiston kehittyminen. Tuloksena on ristiriitainen, vanhaa ja uutta sekoittava kuuntelukemus. Toisaalta moderneissa äänityksissä käytetään hyväksi laajaa taajuuskaistaa, joten vanhentamisen yhteydessä musiikista saattaa jäädä pois oleellisia osuuksia. Uskottavimpia patinointituloksia saavutetaan vanhalla musiikilla, kuten ennen 1900-lukua tehdyillä sävellyksillä, koska silloin musiikin tyyli ei välittömästi paljasta äänitteen aikakautta.

6 KIITOKSET

Tämä työ alkoi vuonna 2004, kun suunnittelimme demonstraatioita tiedekeskus Heureka Musiikki-näyttelyä varten. Tekijät kiittävät näyttelyn suunnittelijaa, Jukka Tiilikaista, hänen avustaan ja innostuksestaan tätä projektia kohtaan. Sira González teki vuosina 2006 ja 2007 lopputyökseen ääniesimerkkejä Sibelius-museolle Johannes Brusilan pyynnöstä. Professori Perry R. Cook (Princeton University, Yhdysvallat) ehdotti termin *antiquing* (suom. patinointi) käyttöä tässä yhteydessä.

LÄHTEET

1. GODSILL S J & RAYNER P J W, *Digital Audio Restoration – A Statistical Model Based Approach*, Springer-Verlag, Lontoo, 1998.
2. KIMMELMA O, PARVIAINEN J & VÄLIMÄKI V, Musiikkiäänitteiden digitaalinen vanhentaminen, *Proc. IX musiikintutkijoiden symposium*, 17.-19.3.2005, Jyväskylä, 55–58.
3. GONZÁLEZ S, *Digital Audio Antiquing*, End-of-studies report, TKK, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo, kesäkuu 2007. Ääniesimerkkejä [www-osoitteessa](http://www.acoustics.hut.fi/publications/papers/antiquing/) <http://www.acoustics.hut.fi/publications/papers/antiquing/>.
4. GODSILL S J, Recursive restoration of pitch variation defects in musical recordings. *Proc IEEE Int Conf Acoustics, Speech, and Signal Processing*, huhtikuu 1994, Adelaide, Australia, vol. 2, 233–236.
5. ESQUEF P A A, BISCAINHO L W P & VÄLIMÄKI V, An efficient algorithm for the restoration of audio signals corrupted with low-frequency pulses, *J Audio Eng Soc* **51**(2003)6, 502–517.
6. ZACHAROV N, VirtualPhone – A rapid virtual audio prototyping environment, *122nd Convention of the Audio Engineering Society*, toukokuu 2005, Wien, Itävalta.
7. IZOTOPE, INC. *iZotope Vinyl*, [www-sivu: http://www.izotope.com/products/audio/vinyl/](http://www.izotope.com/products/audio/vinyl/), 2007.
8. GRONOW P & SAUNIO I, *Äänilevyn historia*, WSOY, Helsinki, 1990.
9. MAES J & VERCAMMEN M, *Digital Audio Technology: A Guide to CD, MiniDisc, SACD, DVD(A), MP3 and DAT*, Oxford, 2001.
10. SCHOENHERR S E, *Recording Technology History* (notes revised Jan. 27, 2005), [www-sivu: http://history.sandiego.edu/gen/recording/notes.html](http://history.sandiego.edu/gen/recording/notes.html), 2005.