

MENETELMÄ KAIUTINELEMENTTIEN EPÄTYYPILLISEN SÄRÖN KUULUVUUDEN ARVIOINTIIN

Sauli Norja¹ Aki Mäki²

¹ Genelec Oy
Hämeentie 130 A, 00560 Helsinki
sauli.norja@genelec.com

² Genelec Oy
Olvitie 5, 74100 Iisalmi
aki.makivirta@genelec.com

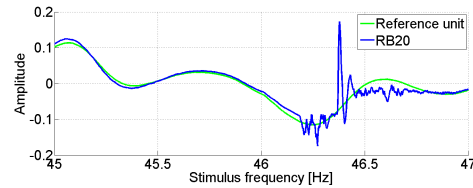
Tiivistelmä

Epätyypillisten särökomponenttien luotettava tunnistus kaiutinelementtien mitauksista on haastavaa. Epätyypillistä säröä on puhekelan liikkumisen aikana tapahtuva mekaaninen hankausääni ja ilmaraossa olevan irtonaisten materiaalin liikkumisen aiheuttama sivuääni (rub and buzz). Ehdotamme uudenlaisen psykoakustisesti motivoitun tavan mitata tällaista liikkumisen sivuääninä syntyvää epätyypillistä säröä siten, että mittauksessa voidaan todeta särön kuuluvuus kaiutinelementin tuottaman hyötyäänä yli. Tämä saavutettiin luomalla kuulomalli, joka vertaa epätyypillisen särön määrää hyötysignaalin luomaan psykoakustiseen peittoon. Uusi mittausmenetelmä tuottaa lupaavia tuloksia epätyypillisten säröjen luotettavaan arviointiin ja tulokset vastaavat särön kuulohavaintoja, jotka voidaan perustella myös aika-taajuusanalyysiä käyttäen.

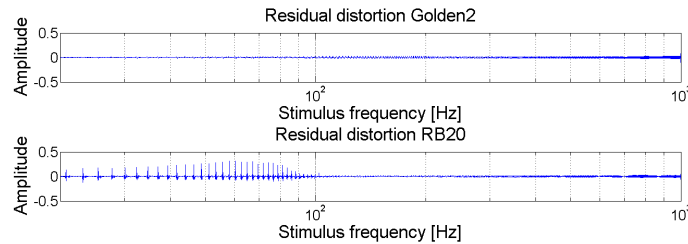
1 JOHDANTO

Kaiutinelementin liikkeen tuottama sivuääni (engl. Rub and Buzz) syntyy usein kaiutinelementin valmistamisen virheiden seurauksena [1]. Sivuaäntä tuottaa puhekelan hankaus magneettiipiiriin rakenteisiin, puutteellinen liimaus [1, 2] ja irtonaisen materiaalin liikkuminen ilmavälissä puhekelan ja liikkuvien osien vaikutuksesta. Kun sivuääni syntyy irtonaisten partikkelien liikkeestä, särön syntyminen voi riippua kaiutinelementin asennosta. Sivuaänet syntyvät usein satunnaisesti, voivat olla impulsiivisia ja voivat riippua voimakkaasti kaiutinelementin liikkeen laajuudesta [3, 4]. Kun partikkelin osumat synnyttävät impulsseja, sivuäänien spektrisisältö on laajakaistainen, jonka vuoksi liikkeen aiheuttamaa sivuaäntä ei ole helppo havaita perinteisin harmonisen säröanalyysin keinoin [3]. Sivuaäni nähdään usein spektrikomponentteina taajuuksilla, jotka ovat kaiutinelementin tuottaman äänen taajuuskomponenttien kokonaislukukerrannaisia. Sivuaäni voi esiintyä korkeammilla taajuuksilla kuin tavallinen harmoninen särö [2]. Liikkeen

Copyright ©2025 Sauli Norja ja Aki Mäki. 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: Virheettömän (vihreä) ja viallisen (sininen) kaiutinelementin aikatason vasteet.

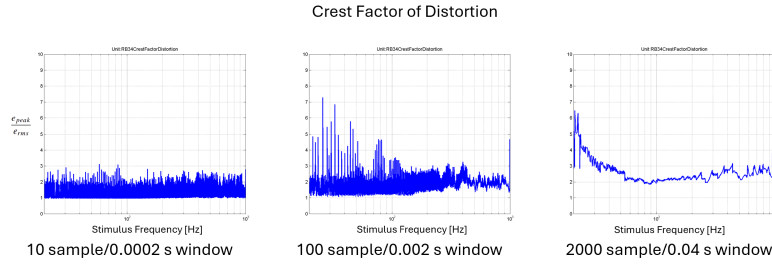


Kuva 2: Liikkeen aiheuttamat sivuäänät erotettuna aikatason vasteesta virheettömän (ylempi) ja viallisen (alempi) kaiutinelementin mittauksesta.

tuottama sivuääni voi ilmetä purskeina [2], kun liikkuminen synnyttää hankausta, irtonaisen materiaalin liikettä, liimaliitosten liikettä tai kun Litz-lanka rajoittaa kartion liikettä tai koskettaa liikkuviin osiin. Sivuuänen syntyminen purskeina nostaa korkeataajuisien harmonisten äänestien tasoa [2]. Sivuuäni voi lisätä intermodulaatiosärön tasoa [5] ja näkyy usein ääneksinä herätesignaalin matalan kertaluvun harmonista säröä korkeammilla taajuuksilla [3]. Sivuuäni ei aina liity hyötysignaalin taajuuteen, vaan enemmän osien liikeamplitudiin [6]. Sivuuäni voi olla impulssimaista ja ei-jaksollista [7]. Kun impulsiivista sivuääntä syntyy irtonaisisten partikkeleiden tai osien liikkussa, se saattaa kuulostaa samalta kuin korkeamman asteen harmoninen särö [7]. Liikkumisen tuottaman sivuuänen kuuluvuus on yleensä hyvä, koska sen taajuuskomponentit sijaitsevat yleensä kaukana hyötysignaalista, jolloin hyötysignaali ei tuota riittävää peittoa [4, 8] ja siksi sen löytäminen tuotannon tarkastuksessa on olennaista.

2 METODI

Liikkumisen aiheuttaman sivuuänen kvantifointimenetelmä käyttää eksponentiaalista sinipyyhkäisyä ja kuuluvuusmallia, joka mukailee Van de Par ym. [9] häviöllisen äänenpakkauksen tuottamien säröjen havaittavuuden arvioinnin menetelmää. Klippel ym. [4] menetelmää käytetään myöhemmin analysoitaessa, mistä syystä särökomponentit ovat syntyneet. Kvantifointimenetelmä vertaa kaiutinelementin vastetta referenssielementtiin, jonka toiminta tiedetään laadukkaaksi. Tätä varten elementin vaste synkronoidaan vertailuelementin vasteeseen. Tässä työssä synkronointiin käytetään erillistä synkronointisignaalia. Synkronointi voidaan toteuttaa monella eri tavalla, esimerkiksi korrelaatiolaskentaa käyttäen tai tahdistamalla vaste syöttösignaaliin muulla tavoin. Synkronoinnin jälkeen lasketaan mitattavan kaiutinelementin ja referenssin aikavasteiden erotussignaali, joka sisältää kaiutinelementin vasteen epätyypilliset säröt ja taustakohinaa. Erotussignaalin huippukerroin indikoi hyvin liikkeen sivuuäänien esiintymistä [4], mutta huippukertoimen tarkastelussa käytetyn aikaikkunan väärä pituus saattaa estää



Kuva 3: Ikkunan pituuden vaikutus huippukertoimeen.

särön näkymiseen huippukertoimen arvoissa (kuva 3). Kun syötteenä käytetään sini-pyyhkäisyä, kaiutinelementin liikepoikkeama voidaan laskea paineen hetkellisarvon perusteella, integroimalla painearvo. Vaikka liikepoikkeamaestimaatti ei ole tarkka, siitä on hyötyä arvioitaessa, missä liikeradan kohdassa sivuäänät syntyvät. Liikepoikkeaman verhoikäyrä kuvaa hetkellistä liikemagnitudia. Mitattavan elementin liikemagnitudin ero referenssiin nähdään normalisoimalla sen liikemagnitudiestimaatti referenssielementin liikemagnitudiestimaatilla.

Kuuluvuusmalli huomioi siirtofunktion ulkokorvasta sisäkorvaan käänteisen kuulokynnyksen avulla, joka tässä on ISO-226 standardin mukainen kuulokynnys nollan fonin tasolla [10]. Kuulon kriittiset kaistat ovat sisäkorvan ominaisuus ja se mallinnetaan gammatone-suodatinpankkina γ [9], joka on toteutettu käyttäen Auditory Modeling Toolbox -kirjastoa [11]. Sivuuänen s psykoakustista peittymistä tuottaa kaiutinelementin toistama testiäänä m . Kuuluvuusmalli [9] segmentoi äänen N mittaisiin segmentteihin ja vertaa psykoakustisen peiton M_i määrää sivuuänen määrään S_i segmentteittäin gammatone-pankin kriittisillä kaistoilla γ_i kaikilla taajuuksilla f ,

$$M_i = \frac{1}{N} \sum_f |H_{om}(f)|^2 |\gamma_i(f)|^2 |m(f)|^2, \quad S_i = \frac{1}{N} \sum_f |H_{om}(f)|^2 |\gamma_i(f)|^2 |s(f)|^2. \quad (1)$$

Kokonaishavaittavuus D on summa kriittisten kaistojen i havaittavuuksista $D_i = S_i/(M_i + C_a)$ ja ottaa huomioon kuulojärjestelmän sisäinen kohinan C_a , joka rajaa hiljaisten äänikomponenttien havaittavuutta,

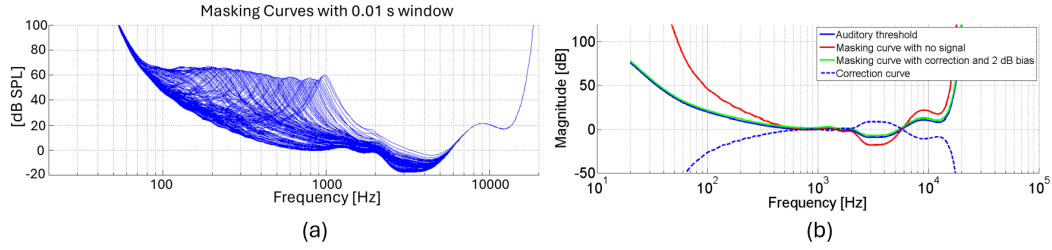
$$D = C_s L \sum_i \frac{S_i}{M_i + C_a} = C_s L \sum_i \frac{\sum_f |H_{om}(f)|^2 |\gamma_i(f)|^2 |s(f)|^2}{\sum_f |H_{om}(f)|^2 |\gamma_i(f)|^2 |m(f)|^2 + C_a}. \quad (2)$$

Keroin L valitaan aikaikkunan pituuden ja kuulon aikaintegrointiominaisuuden (300 ms) suhteena siten, että $L \leq 1$. Taajuudella f_m sijaitseva särökomponentti, jonka magnitudi on v ja kokonaishavaittavuus $D = 1$, tuottaa taajuustasossa peiton $1/(v^2(f_m))$ [9]

$$\frac{1}{v^2(f_m)} = C_s L \sum_i \frac{|H_{om}(f_m)|^2 |\gamma_i(f_m)|^2}{\sum_f |H_{om}(f)|^2 |\gamma_i(f)|^2 |m(f)|^2 + C_a} \quad (3)$$

Laskentaan tarvittavan vakion C_a arvo saadaan olettaen, että kuulokynnyksellä juuri kuuluva tasoero (JND) on 1 dB taajuudella 1 kHz, jolloin [5]

$$C_a = C_s L \sum_i |\gamma_i(f_{1kHz})|^2. \quad (4)$$



Kuva 4: Mittasignaalin lasketut peittokäyrät (a) ja kuulokynnyksen korjaus (b), jossa havaintokynnys ilman signaalia (punainen), korjattu havaintokynnys (vihreä), kuulokynnys (sininen) ja sen korjaus (sininen katkoviiva).

Edelleen, vakion C_S arvo voidaan ratkaista olettaen, että pistetaajuudella särötason on oltava 17 dB alempi kuin hyötysignaalin, jotta säröä ei havaita. Olettaen äänitasot $A_{53} = 53$ dB (särö) ja $A_{53} = 70$ dB (hyötysignaali),

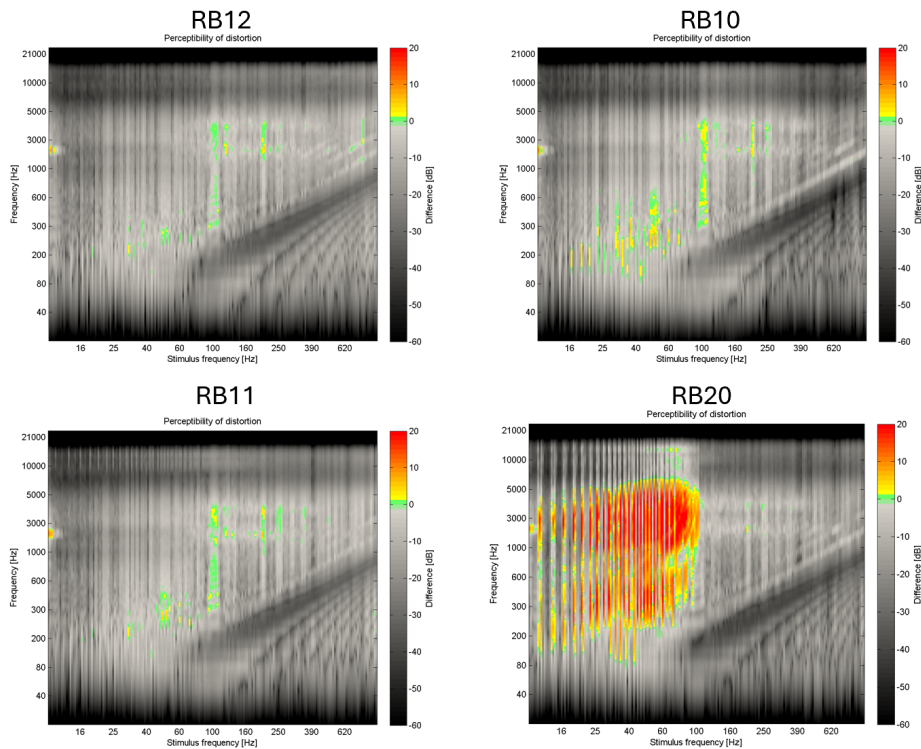
$$\frac{1}{C_s} = L \sum_i \frac{\sum_f |H_{om}(f_{1kHz})|^2 |\gamma_i(f_{1kHz})|^2 A_{53}^2}{\sum_f |H_{om}(f_{1kHz})|^2 |\gamma_i(f_{1kHz})|^2 A_{70}^2 + C_a}. \quad (5)$$

Malli kalibroitiin kuuntelukokeella. Ilman signaalia mallin tulee ennustaa havaintokynnys samaksi kuin kuulokynnys. Jotta näin tapahtuisi, kynnystietoa H_{om} korjattiin alaspäin matalilla (< 500 Hz) ja hyvin korkeilla taajuuksilla (> 6 kHz) ja ylöspäin keskitaajuusalueella 2-5 kHz. Sivuäänien kuuluvuus nähdään nyt vertaamalla särösignaalin (kaiutinelementin ja referenssielementin aikavasteiden erotus) tehospektriä psykoakustiseen peittoon, jonka hyvälaatuisen referenssielementin toistama hyötysignaali tuottaa. Särö havaitaan taajuuksilla, joilla särösignaali ylittää peiton. Kun toistettava hyötysignaali on sinipyyhkäisy, särön kuuluvuutta voidaan tarkastella pyyhkäisyn eri taajuuksilla, jolloin syntyy spektrogrammin kaltainen *kuuluvuusspektri*, josta nähdään, millä toistettavilla taajuuksilla liikkumisen aiheuttama sivuääni tuottaa kuultavissa olevan havainnon. Tämä auttaa ymmärtämään sivuäänien syntymekanismeja. Kuuluvuusspektri voi ilmaista värikoodilla, kuinka paljon särö ylittää psykoakustisen peiton ja sen ilmaisukykyä voidaan lisätä ulottamalla väriasteikko 1–2 dB havaitsemiskynnyksen alapuolella, mikä on perusteltua, koska vähäiset särötasot saattavat olla havaittavissa, kun kuulo on jo aikaisemmin tunnistanut säröt [8].

3 TULOKSET

Kuuntelukokeessa arvioitiin neljä eri tavoin viallista kaiutinelementtiä RB10, RB11, RB12 ja RB20. Kuuntelukokeen tavoite oli tutkia mittausten menetelmän indikaation luotettavuutta. Koe toteutettiin Genelec 8550A-kuulokkein, jotka kalibroitiin Genelec 9320A-vahvistimen signaalinkäsittelyn avulla, jotta kuuntelutestausympäristö olisi luotettava ja siirrettävä. Kuuntelukokeeseen osallistui kolme tuotantoyöntekijää ja viisi akustiikka-tiimin jäsentä. Tuotantoyöntekijät ovat erikoistuneet havaitsemaan kaiuttimien säröjä. Epätavallisen särön havaittavuus kuuluvuusspektrissä (kuva 5) vastasi pääosin särön subjektiivisesti havaittua voimakkuutta ja taajuussisältöä.

Kun viallisia kaiutinelementtejä tutkittiin kaupallisella järjestelmällä (Klippel QC), se näytti yliarvioivan epätavallisen särön tason matalilla taajuuksilla, kun taas kuulomallin



Kuva 5: Kuuluvuuspektrit kaiutinelementeille RB12, RB10, RB11 ja RB20.

ilmaisema havaittavuus näytti sopivan paremmin yhteen subjektiivisten havaintojen kanssa. Erityisen voimakkaasti kaupallinen järjestelmä näytti aliarvioivan voimakkaasti hankaavan puhekelan aiheuttaman särön ja suurien impulsiivisten säröjen kuuluvuutta.

4 DISKUSSIO

Epätyypillisen särön kuuluvuuden havaitseminen mittamalla näytti edellyttävän ihmisen kuulojärjestelmässä tapahtuvan peittovaikutuksen huomioimista. Työssä kehitetty malli näytti löytävän hyvin tuotannossa esiintyvät kaiutinelementtien epätyypilliset särölajit ja ennusti järkevästi epätyypillisten säröjen havaittavat taajuuskomponentit. Mallin viritystä voidaan tulevaisuudessa parantaa käyttämällä tarkasti kalibroitua mittausjärjestelmää. Perinteiset aikatasomenetelmät eivät sen sijaan näytä ottavan riittävästi huomioon särön spektriä tai hyötysignaalin peittovaikutusta ihmisen kuulon kannalta.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää luotettava menetelmä epätyypillisten säröjen havaitsemiseen, koska tällaisten säröjen havaitseminen kaiutinten laadunvalvonnassa on välttämätöntä. Psykoakustisesti motivoitu tapa mitata kaiutinelementin osien liikkumisen sivuäänenä syntyvää epätyypillistä säröä siten, että syntyy tieto särön kuuluvuudesta kaiutinelementin tuottaman hyötysignaalin yli, saatiin aikaan luomalla kuulonmalli, joka vertaa särön määrää hyötysignaalin tuottamaan psykoakustiseen peittoon. Uusi menetelmä näytti olevan luotettavampi kuin nykyiset kaupalliset menetelmät.

VIITTEET

- [1] Gregory G. Groeper, Mark A. Blanchard, Terry Brummett, and Jeff Bailey. A reliable method of loudspeaker rub and buzz testing using automated FFT response and distortion techniques. In *Audio Engineering Society Convention 91*, number 3161, October 1991.
- [2] Stefan Irrgang, Wolfgang Klippel, and Ulf Seidel. Loudspeaker testing at the production line. In *Audio Engineering Society Convention 120*, number 6845, May 2006.
- [3] Steve Temme, Pascal Brunet, and Evan Chakroff. Loose particle detection in loudspeakers. In *Audio Engineering Society Convention 115*, number 5883, October 2003.
- [4] Wolfgang Klippel and Ulf Seidel. Measurement of impulsive distortion, rub and buzz and other disturbances. In *Audio Engineering Society Convention 114*, number 5734, March 2003.
- [5] Steve Temme, Pascal Brunet, and D. B. (Don) Keele. Practical measurement of loudspeaker distortion using a simplified auditory perceptual model. In *Audio Engineering Society Convention 127*, number 7905, October 2009.
- [6] Steve Temme and Pascal Brunet. Enhancements for loose particle detection in loudspeakers. In *Audio Engineering Society Convention 116*, number 6164, May 2004.
- [7] Steve Temme, Rahul Shakya, and Jayant Datta. A new method for transient distortion detection. In *Audio Engineering Society Convention 155*, number 155, October 2023.
- [8] Hugo Fastl and Eberhard Zwicker. *Psychoacoustics: Facts and Models*, volume 22. Springer Science & Business Media, 2006.
- [9] Steven van de Par, Armin Kohlrausch, Ghassan Charestan, and Richard Heusdens. A new psychoacoustical masking model for audio coding applications. In *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 2, pages II–1805–II–1808, 2002. doi: 10.1109/ICASSP.2002.5744974.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 226:2023 Acoustics — Normal equal-loudness-level contours, 2023. URL <https://www.iso.org/standard/83117.html>
- [11] Peter Søndergaard and Piotr Majdak. The auditory modeling toolbox. In Jens Blauert, editor, *The Technology of Binaural Listening*, pages 33–56. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.