KAIUTTIMEN SUUNTAAVUUS: SUUREET JA ESITYSTAVAT

Olli Kantamaa[1]

[1] Genelec Oy
Olvitie 5 74100 Iisalmi
olli.kantamaa@genelec.com

Tiivistelmä

Kaiuttimen suuntaavuudella tarkoitetaan kaiuttimen ominaisuutta säteillä ääntä avaruuteen. Suuntaavuudelle on määritelty useita erilaisia suureita kuten suuntaavuusindeksi ja tehovaste. Suuntaavuuden merkityksestä havaittuun äänenlaatuun on tehty monenlaisia havaintoja perustuen karkeisiin suuntaavuuskäsitteisiin. Suuntaavuus on kuitenkin moniulotteinen käsite, joten suuntaavuuden kuvaaminen yhdellä suureella ei kuvaa todellisuutta. Kaiuttimen konfiguraatio luo suuntaavuuteen selkeästi erottuvia artefakteja jotka voidaan tunnistaa kuvaajista, mutta joita ei voi yksittäisen suureen perusteella havannoida. Suuntaavuuskuvaajan piirtotapoja on kuitenkin monia ja kaiuttimien ominaisuuksien tulkitseminen kuvaajien avulla voi johtaa sekä oikeisiin että vääriin johtopäätöksiin.

1 JOHDANTO

Kaiuttimen suuntaavuus on kaiuttimen ominaisuus säteillä ääntä avaruuteen. Kaiuttimen suuntavuudella ja akustisen akselin suuntaisella taajuusvasteella eli akselivasteella (engl. on–axis response) on suuri merkitys kuuntelupaikalla mitattuun taajuusvasteeseen ja havaittuun äänenlaatuun. Vasteen tasaisuus vapaakentässä on helppo todeta. Suuntaavuus on kolmiulotteinen ominaisuus ja sen esittäminen on huomattavasti monimutkaisempaa.

Suuntaavuudelle on vuosien varrella määritelty useita kuvaavia suureita kuten tehovaste, suuntaavuusindeksi ja dispersio. Näitä suureita on käytetty tuotteiden tietolehtisten lisäksi myös standardeissa ja suosituksissa kuvaamaan kaiuttimelta vaadittavaa suorituskykyä. Yksittäisten suureiden suurin ongelma on kuitenkin niiden rajallinen esittämiskyky. Yksittäisellä numerolla on vaikea kuvata kolmiulotteista ja taajuusriippuvaista ominaisuutta ja arvioida suuntaavuuden todellista vaikutusta havaittuun äänenlaatuun ja huonekäyttäytymiseen.

Piirtämällä suuntaavuussuureista kuvaajia taajuuden suhteen saavutetaan karkea kuva kaiuttimen säteilemästä energiamäärästä huoneeseen. Kuitenkaan esimerkiksi tehovasteen piirtäminen ja tulkitseminen ei kerro vielä säteilyn absoluuttisesta suunnasta. Kahdella täysin eri tavalla suuntavalla kaiuttimella saattaa olla samanlainen tehovaste, jolloin tarvitaan tarkempaa kuvausta suuntaavuuden hahmottamiseksi.

Copyrigth ©2019 Olli Kantamaa. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –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.

2 MOTIVAATIO

Suuntaavuuden on esitetty vaikuttavaan muun muassa virtuaaliäänikuvien sijoittumiseen ja laatuun, tilantuntuun, äänenväriin, kuuntelualueen kokoon, lokalisaatioon ja yleiseen vaikutelmaan äänestä [1]. Vaikka akustisen akselin taajuusvasteen on todettu vaikuttavan keskeisesti kuuntelukokemukseen [2], on suuntaavuuden esitetty vaikuttavan edellä mainittuihin attribuutteihin huonevasteen välityksellä [3, 4].

Suuntaavuuden merkityksen arviointi on helpointa kysymällä kuulijoilta äänenvärin havaitsemiseen ja äänen lokalisaatioon liittyviä vaikutuksia. Lokalisaatio liittyy äänikuvan sijoittumisen ja rakenteen sekä tilantunnun kokemukseen. Äänenvärin havaitsemisella viitataan kuunneltavan materiaalin taajuusbalanssin uskottavuuteen ja siihen, että toisto olisi uskollinen alkuperäiselle äänitteen äänenvärisisällölle. [3]

Tilantunnun, stereokuvan ja lokalisaation kannalta ei ole osoitettu, että olisi olemassa huoneessa sijaitsevalle kaiuttimelle optimaalinen suuntaavuuden arvo [5]. Simuloitujen aikaisten heijastusten tasoa ja viivettä suhteessa suoraan ääneen säätämällä on todettu aikaisten heijastusten vaikuttavan ensisijaisesti äänen lokalisaation havaitsemiseen. [8, 6, 7]

Suuntaavuuden on ajateltu vaikuttavan äänenvärin kokemiseen kuuntelupaikalla [3]. Huoneen ominaisuudet ja kaiuttimen sijainti vaikuttavat olennaisesti äänenvärin kokemukseen. Kaiuttimen sijainti vaikuttaa suoraan huonemoodien heräämiseen ja seisovat aallot huoneessa vaikuttavat eritoten matalilla taajuuksilla äänenvärin kokemukseen [9]. Huoneen jälkikaiunta-aika vaikuttaa käsitykseen kaiuttimen äänenlaadusta [10, 3] enemmän kuin aikaiset heijastukset [8]. Aikaiset heijastukset voivat kuitenkin tuottaa merkittäviä äänenvärikokemuksia. Tyypillisin esimerkki aikaisen heijastuksen vaikutuksesta äänenväriin on laaja-alainen keskialuevärittymä, joka syntyy studion konsolista tai työpinnasta aiheutuvan merkittävän heijastuksen takia [11, 12].

Alabassokaiuttimen (subwooferin) käyttöä perustellaan sillä, että sen avulla voidaan saavuttaa hallittu matalien taajuuksien äänenväri kuuntelupaikalla ilman merkittävää äänen lokalisoitumisen heikentymistä [13, 14]. Alabassokaiutin voi kuitenkin vaikuttaa lokalisaation havaitsemiseen keskitaajuuksilla [6, 15] sopivissa olosuhteissa kriittisellä testisignaalilla, jolloin alabassokaiutin voi lokalisoitua erillisenä äänilähteenä [16]. Yleisesti lokalisoitumiseen vaikuttava ominaisuus on korkeammilla taajuuksilla tapahtuva kaiuttimen suuntaavuuden muuttuminen [15].

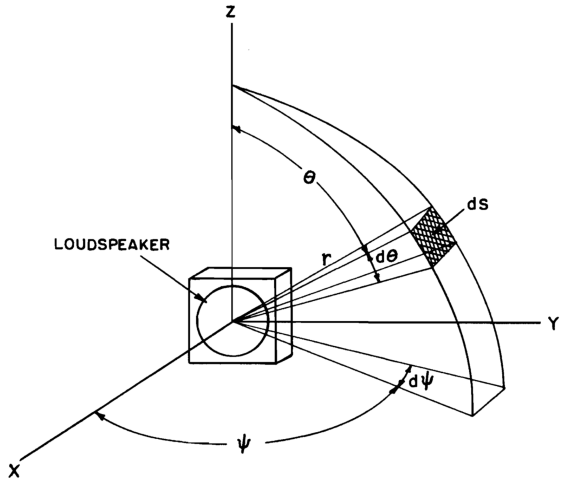
Tutkimuksissa on keskitytty täysin erilaisten kaiuttimien äänensäteilyperiaatteiden, kuten dipolisäteilyn ja ympärisäteilevyyden vaikutusten analysoimiseen huonekuuntelussa [1]. Vaikka eri säteilyperiaatteiden on raportoitu tuottavan samankaltaisia äänikuvia, pienemmilläkin suuntaavuuden muutoksilla on havaittu olevan merkitystä kuuntelukokemukseen [17, 10]. Yhteistä tutkimuksille on suuntaavuuksien väljä kuvailu. Tyypillisesti kaiuttimeen viitataan esimerkiksi adjektiiveilla ympärisäteilevä, dipolimainen, tavanomainen, kaksitie, jatkuva, pehmeä, tasainen ja kardioidi. Tarkempia vapaakentässä suoritettuja mittauksia sisältyi ainoastaan harvoin raportointiin, eismerkiksi [10]. Kuitenkin kaiuttimen suuntaavuuden ajatellaan yleisesti vaikuttavan merkittävästi havaittuun kuulokuvaan.

3 METODI

3.1 Tehovaste ja Suuntaavuusindeksi

Tehovaste (engl. power response) kuvaa kaiuttimen avaruuteen säteilemää akustista tehoa. Tehovaste P_{AD} lasketaan integroimalla kaiuttimen säteilemä teho pallon pinta-alan yli ds kokoisissa sektoreissa kuvan 1 mukaan. Tehovaste approksimoidaan mittaamalla kaiuttimen energia erikseen ϕ ja θ kulmien funktiona ja ekstrapoloimalla kaikki niiden väliset kulmat [18]. Kulman ϕ varioiminen vastaa horisontaalitasoa ja kulman θ suhteessa xy-tasoon varioiminen vastaa vertikaalitasoa.

Suurempi tehovaste pistetaajuudella tarkoittaa kaiuttimen olevan vähemmän suuntaava kyseisellä taajuudella olettaen että kaiuttimen akustisella akselilla taajuusvaste on tasainen vapaakentässä. Kirjallisuudesta löytyviä tehovasteen tulkintoja on monenlaisia. Osa tutkimuksista pitää tehovastetta merkityksellisempänä tekijänä äänenvärin havaitsemiseen kuin akselivastetta [19].



Kuva 1: Kaiutin esitettynä karteesisessa ja pallomaisessa koordinaatistossa. [18]

Suuntaavuusindeksi (engl. directivity index) määritellään akselivasteen sekä tehovasteen erotuksena [15]. Tasaisen akselivasteen omaavan kaiuttimen suuntaavuusindeksin kuvaaja on siis tehovasteen peilikuva.

Suuntaavuusindeksi on taajuusriippuvainen suure ja yleensä se esitetäänkin taajuuden funktiona. Ympärisäteilevän kaiuttimen suuntaavuusindeksi on pienempi kuin suuntaavan kaiuttimen. [18]

ITU-R on suosittanut vuodesta 1994 lähtien kaiuttimen suuntavuusindeksiksi

$$6dB \leq C \leq 12dB \tag{1}$$

taajuuksilla 500 Hz – 10 kHz. [20]. Kun taas Claumarch ilmoittaa toivotuksi suuntavuudeksi mahdollisimman pienen suuntaavuusindeksin. [21].

3.2 Vasteet

Akselivasteen lisäksi kaiuttimien datalehtisissä tyypillisesti ilmoitetaan sivukentissä, 15, 30, 45 ja 60 asteen kulmilla, mitatut vasteet vapaakentässä. Mittaukset tehdään sekä vertikaali– että horisontaalkulmien ϕ ja θ suuntaisesti. Vasteet myös pehmennetään (engl. smoothing) jolloin niistä saadaan helpommin luettavia. Tyypilliset pehmennykset ovat 1/48 ja 1/3 oktaavin väliltä.

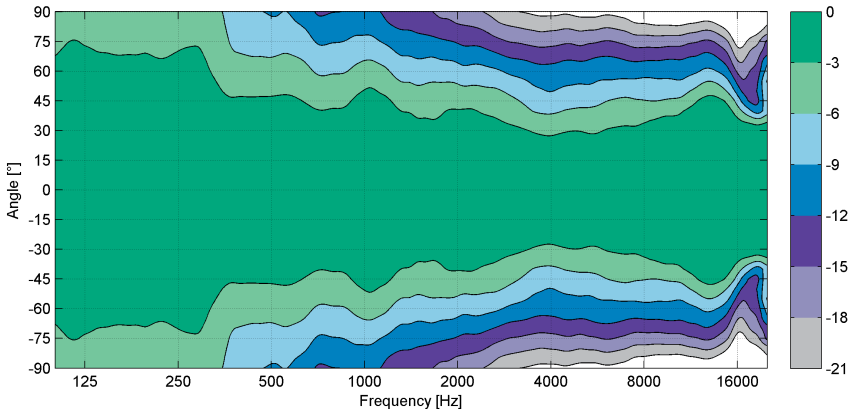
Vasteiden tulkinta on huomattavasti hankalampaa sillä ne eivät sisällä vain yhtä lukua, vaan useita eri käyriä. Vertikaalinen suuntaavuus on erityisen hankala tulkittava, sillä viidellä vastekuvaajalla ei pystytä kuvaamaan pystysuunnassa epäsymmetrisen kaiuttimen säteilyä. 6

Vasteiden muodosta ei ole annettu varsinaisia suosituksia. Yleisesti suositaan johdonmukaisesti käyttäytyviä vasteita joissa ei ole suuria yhtäkkisiä kehityssuunnan muutoksia. Enemmän suuntaavan kaiuttimen sivukenttävasteet ovat luonnollisesti enemmän vaimentuneita kuin vähemmän suuntaavan kaiuttimen. Ideaalisen ympärisäteilevän sivukenttävasteet ovat identtisiä akselivasteen kanssa.

3.3 Suuntaavuuskuvaaja

Suuntaavuuskuvaajassa (engl. directivity plot) yhdistyy polaarikuvaajan kulmaresoluutio sekä vastekuvaajan magnitudiresoluutio. Suuntaavuuskuvaaja piirretään normitettuna sopivan äänenpainekeskiarvon ympärille. Ryhmittämällä mittapisteitä haluttujen rajojen sisään ja piirtämällä ääriviivakuvaaja näille rajoille. Visualisaation auttamiseksi ääriviivojen välit täytetään väreillä.

Suuntaavuuskuvaajan piirtomenetelmässä voidaan muokata taajuuspehmennystä, kulma–asteikkoa sekä magnitudiresoluutiota. Suuntaavuuskuvaaja piirretään erikseen horisontaali– ja vertikaalitasolle. Suuntaavuuskuvaajan esiaste oli niin sanottu dispersiokuvaaja jossa käytettiin yleensä kiinteää -6 dB:n rajaa kaiuttimen peittoalueelle [22].

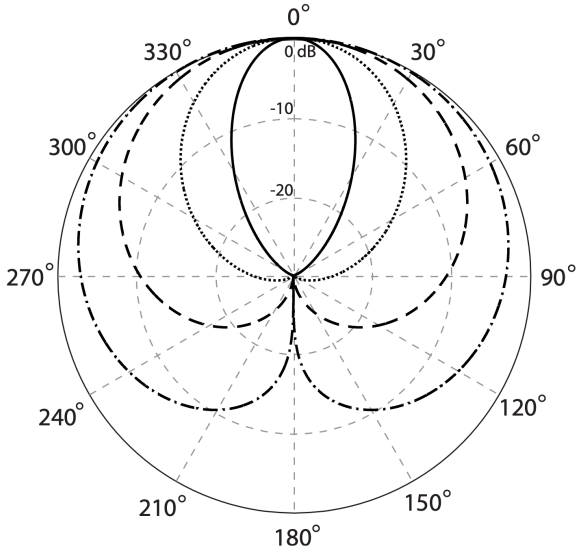


Kuva 2: Esimerkki suuntaavuuskuvaajasta. 3 dB resoluutio.

3.4 Polaarikuvaaja

Polaarikuvaaja (engl. polar plot) on napakoordinaatistoon piirretty kuvaaja, jossa äänenpaine esitetään kulman funktiona yhdelle taajuudelle kerrallaan joko kulman θ tai ϕ funktiona. Polaarikoordinaatistossa suuntaavuutta kuvatessa tarvitaan aina yhtä monta kuvaajaa kuin on taajuuksia.

Kuvassa 3 on esitetty polaarikoordinaattiesitys tavoiteltavasta kaiuttimen suuntaavuudesta. Hyvin suuntaavan kaiuttimen polaarikuvaajan muodosta on annettu useita eri suosituksia mutta suositukset koskevat yleensä pistetaajuuksia.



Kuva 3: Polaarikuvaaja jossa on esitetty pyöreän kaiutinrykelmän tavoitesuuntavuus [23] mukaan. Taajuudet 500 Hz – 4 kHz.

4 TULOKSET

4.1 Mittausjärjestelyt ja -kohteet

Tässä tutkimuksessa mitattiin kaksi kaiutinta kaiuttomassa huoneessa tietokoneella ohjatun kääntöpöydän päällä 5 asteen välein vertikaali- ja horisontaalisuunnissa. Huoneen korjauskertoimia ei käytetty tulosten vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi. Kääntöpöydästä todettiin aiheutuvan heijastuksia 300 Hz:n ympäristössä, muita haittavaikutuksia ei havaittu vertaillessa mittauksia.

Kaittimet A ja B ovat ammattikäyttöön tarkoitettuja pieniä kolmitiekaittimia. Kaiutin A on perinteinen kolmitiekaiutin jossa elementit ovat sijoitettu erilleen etupaneeliin. Kaiutin B on rakenteeltaan koaksiaalinen jossa kaikki elementit sijaitsevat symmetrisesti akustisen akselin suhteen. Kaiuttimien ilmoitetut spesifikaatiot ovat luettavissa taulukosta 1.

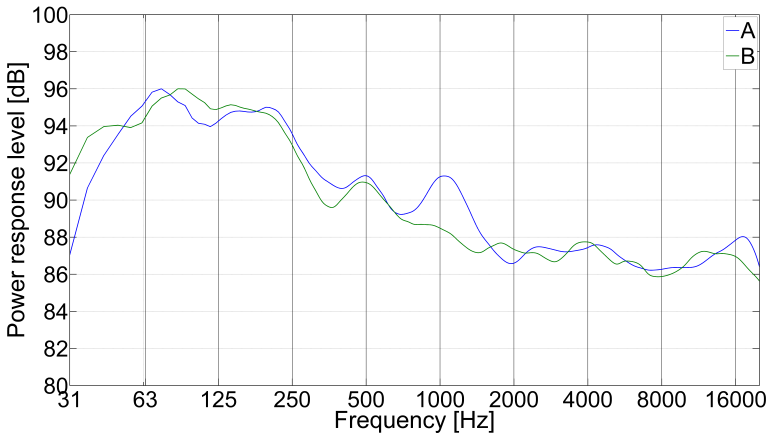
	A	B
Ulkotilavuus	28.3 litraa	31 litraa
Toistoalue [-6 dB]	30 -22 kHz	32 - 43 kHz
Kotelo	Suljettu	Refleksi
Diskantti	25 mm metallikalotti	25 mm metallikalotti
Keskiääni	75 mm silkkikalotti	130 mm metallikartio
Basso	8 tuumaa	8 tuumaa vastaava
Alajakotaajuus	650 Hz	320 Hz
Yläjakotaajuus	2000 Hz	2800 Hz
Suuntaimen koko	96 × 133 mm	230 × 330 mm

Taulukko 1: Yhteenveto tarkasteltavien kaiutinten ominaisuuksista.

Kummankin kaiuttimen särö- ja vastekäyttäytyminen on mittauksien mukaan hyvin samanlaista. 0.5 %:n säröraja ylitetään 100 Hz:n alapuolella. Kummankin taajuusvaste on hyvinkäyttäytyvää ja vaihteluväli on ± 1.5 dB 40 Hz – 20 kHz alueella.

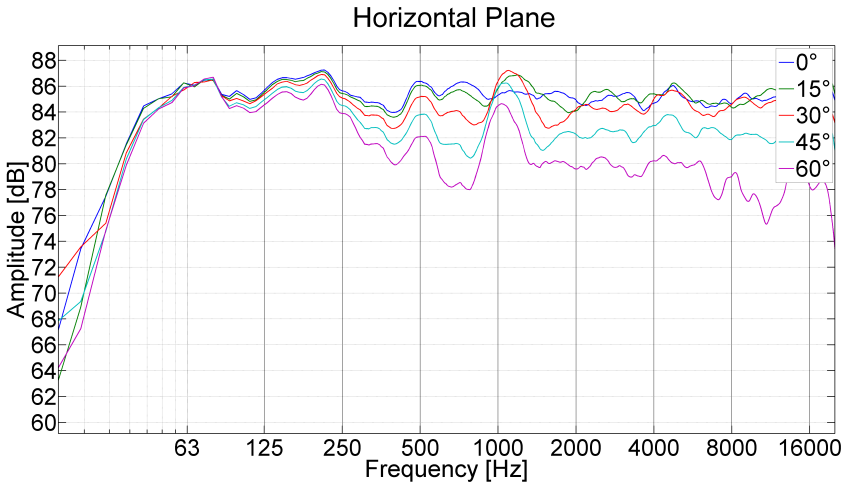
Mitatusta datasta tuotettiin tehovaste, vaste– sekä suuntaavuuskuvaajat.

4.2 Tehovaste ja SuuntaavuusIndeksi

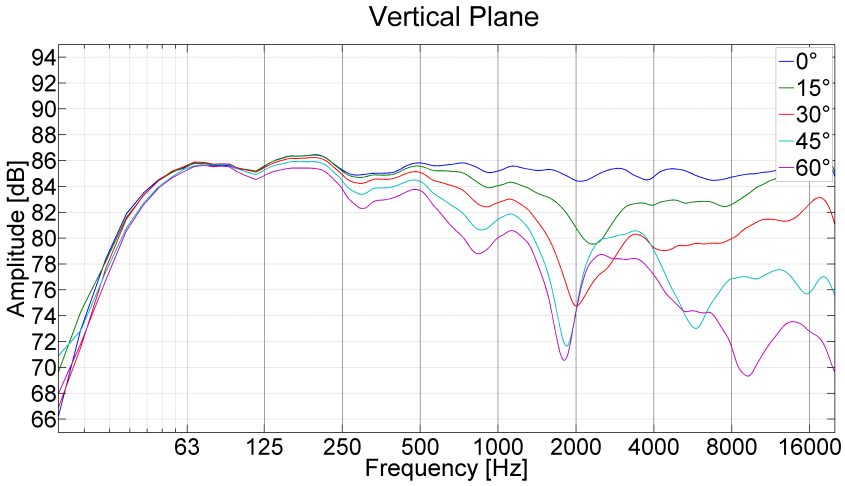


Kuva 4: Kaiuttimien A ja B tehovasteet. 1/3-oktaavin pehmennyksellä.

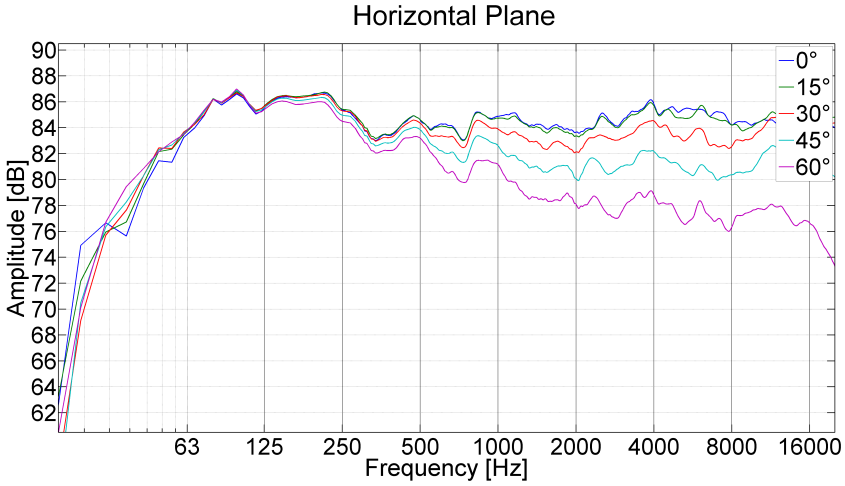
4.3 Taajuusvasteet



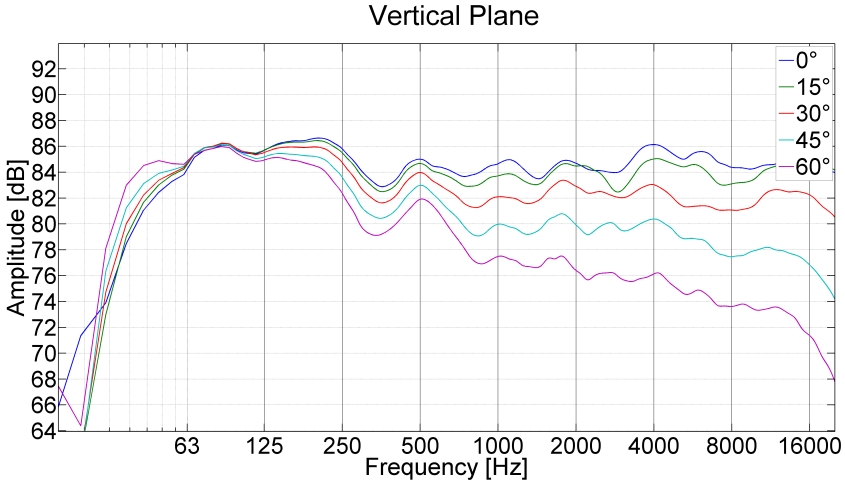
Kuva 5: Kaiuttimen A taajuusvasteet horisontaalitasossa.



Kuva 6: Kaiuttimen A taajuusvasteet vertikaalitasossa.

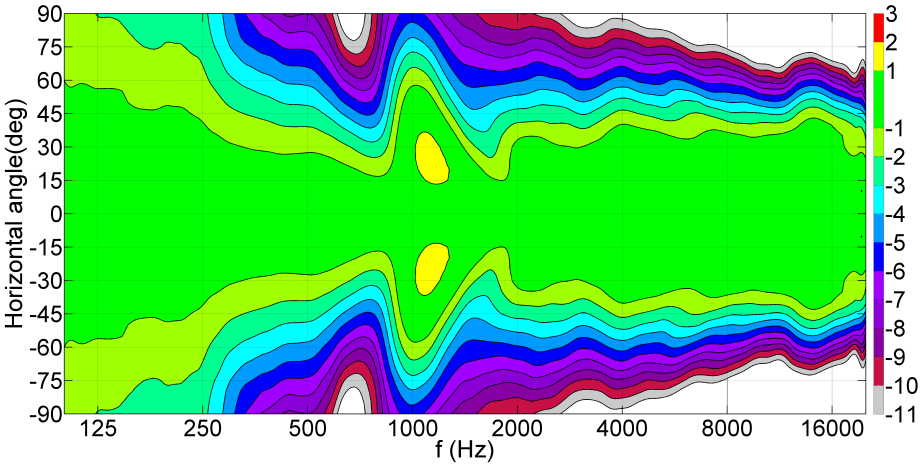


Kuva 7: Kaiuttimen B taajuusvasteet horisontaalitasossa.

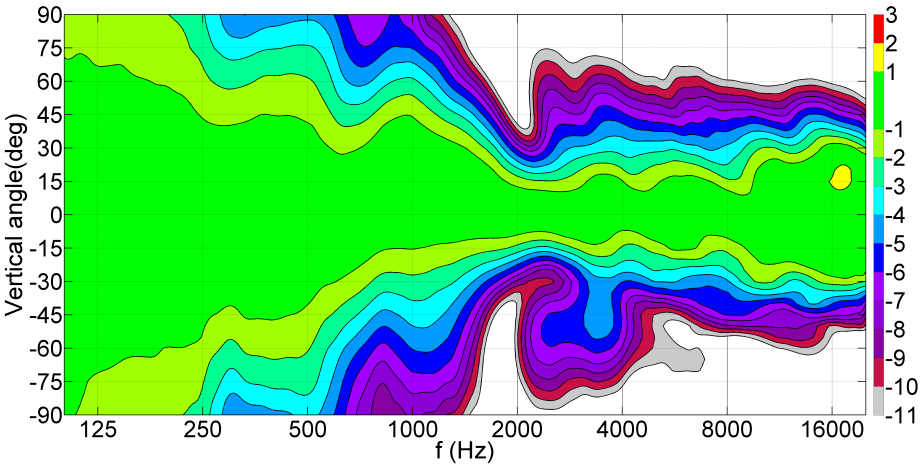


Kuva 8: Kaiuttimen B taajuusvasteet vertikaalitasossa.

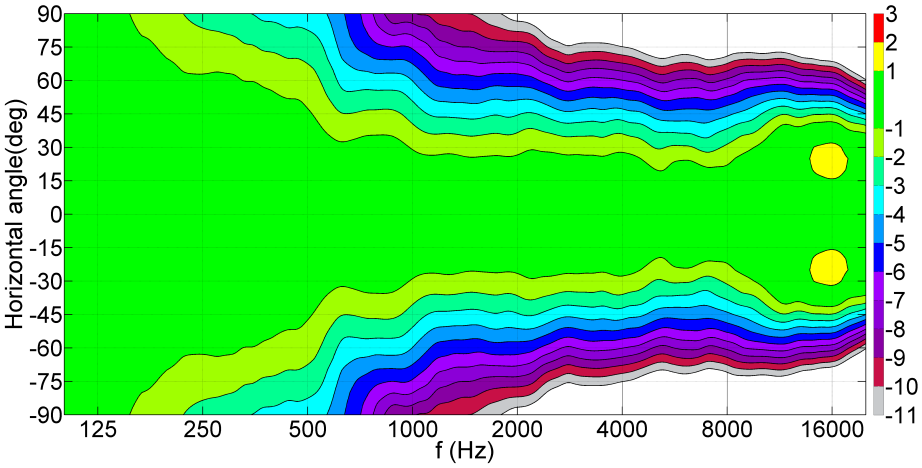
4.4 Suuntaavuuskuvaajat



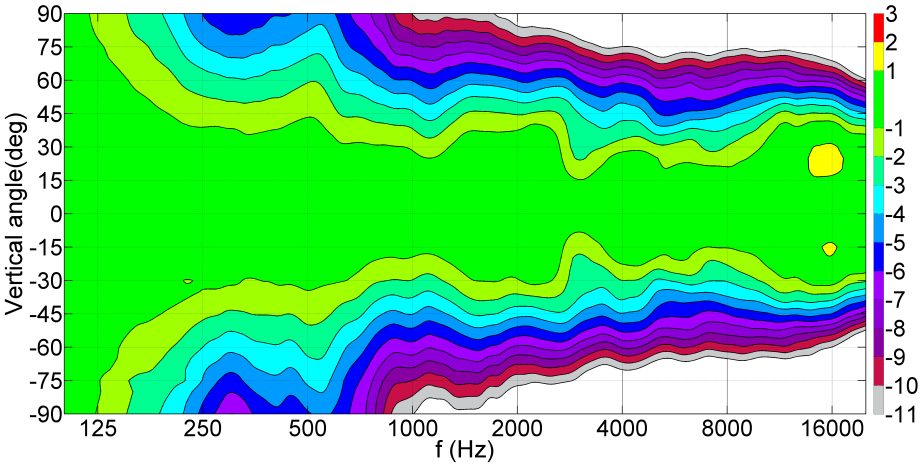
Kuva 9: Kaiuttimen A horisontaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 10: Kaiuttimen A vertikaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 11: Kaiuttimen B horisontaalitason suuntaavuuskuvaaja.



Kuva 12: Kaiuttimen B vertikaalitason suuntaavuuskuvaaja.

5 DISKUSSIO

Kaikilla eri suuntaavuuskuvaajilla on kuitenkin rajoitteita, joiden vuoksi suuntaavuuden määritteleminen voi johtaa virheelliseen lopputulokseen. Tässä työssä tarkastelluista kaiuttimista ei piirretty polaarikuvaajia johtuen valtavasta kuvaajamäärästä, jonka riittävä taajuusresoluutio vaatii. Polaarikuvaajia on käytetty menneisyydessä hyvin yleisenä kuvaajana kuvaamaan torvimaisten suuntaimien säteilykuvioita, myöhemmin kuitenkin kävi ilmi että torven säteilykuvio ei kertonut riittävästi havaitusta äänenlaadusta. [18, 22, 24] Polaarikuvaajien magnitudiasteikko on yleensä liian karkea perinteiselle kaiuttimelle sillä suuntakuvion muutos on merkittävä siirryttäessä matalilta taajuuksille jolloin kuvaaja hukkaa yksityiskohdat karkealla asteikolla.

Tehovaste kuvaa hyvin kaiuttimen säteilemää energiaa huoneeseen, mutta kuuntelupaikalla koettuun äänenväriin ja äänenlaatuun sillä ei ole ollut todistettavia välittömiä vaikutuksia. Tehovasteen kuvaajasta ei käy ilmi mihin suuntaan kaiutin säteilee energian. Esimerkiksi niin sanotun jatkuvasti suuntaavan kaiuttimen tehovaste on tasainen jos akselivaste on tasainen. Tavanomaisen 2– tai 3– tiekaiuttimen akselivasteen ollessa tasainen tehovaste muistuttaa tässä työssä laskettuja tehovasteita kuvassa 4. Myös tehovasteen pehmennyksellä on vaikutusta kuvaajan muotoon, mutta vähemmän kuin muilla mitatuilla kuvaajilla sillä tehovaste on valmiiksi jo keskiarvoistettua dataa.

Vastekuvaajat ovat suhteellisen hyvä kaiuttimen suuntaavuuden mittari ja äänenlaadun muutos on havaittu sivukenttien kuvaajien käyttäytyessä epäjohdonmukaisesti. Vaikka tyypillisesti suuntaavuus esitetään vain viiden käyrän parvella, väliin jäävien kulmien vasteet ovat suhteellisen hyvin ennustettavissa, useamman käyrän piirtäminen samaan kuvaajaan vaikeuttaisi kuvaajien tulkitsemista. Värikoodaus on myös lähes pakollinen sillä käyrät leikkaavat usein toisensa kuten tämänkin työn kuvaajissa 5678. Epävarmuutta vastekuvaajien tulkintaan tuovat kuitenkin pehmennyksen käyttö, 60 astetta suurempien kulmien suuntiin säteilevä akustinen teho ja normalisointi. Normalisointi poistaa akselivasteen vaikutuksen suuntaavuuden tulkinnasta ja tekee suuntaavuuksien vertailusta helpompaa. Akselivaste on kuitenkin olennainen osa äänenvärin kokemusta ja siksi pitäisi ottaa huomioon.

Suuntaavuuskuvaaja sisältää käsitellyistä suuntaavuuden kuvausmetodeista eniten datapisteitä yhdessä kuvassa. Suuntaavuskuvaaja pysyy tulkittavana pienestä magnitudiresoluutiosta huolimatta, eikä kulmaresoluution, eli mittauspisteiden, kasvattaminen huononna tulkittavuutta niin kuin vastekuvaajassa, vaan päinvastoin. Pehmennyksen pienentäminen kun taas huonontaa kuvan luettavuutta huomattavasti jolloin suuren pehmennyksen käyttäminen voi piilottaa pieniä piileviä ongelmia. Kaiuttimen akselivasteen tulkitseminen suuntaavuuskuvaajasta on mahdotonta mikäli kaiuttimen akselivaste ei vaihtele enempää kuin kuvaajan taajuusresoluutio ja tarkka vasteenmuoto on silti hävitetty kuvaajasta. Suuntaavuuskuvaaja sopivilla parametreillä piirrettynä antaa kuitenkin todellisen kuvan kaiuttimen suuntaavuudesta ja sen perusteella pystynee tekemään päätelmiä kuuntelupaikalla havaittuun äänenlaatuun.

Mittavista rakenteellisista eroista huolimatta kaiuttimilla A ja B on huomattavan samanlainen tehovaste jolloin ne säteilevät yhtä paljon energiaa huoneeseen kuvan 4. Kuitenkin muista suuntaavuutta kuvaavista kuvaajista voidaan tulkita kaiuttimien olevan todella eri-

laisia suuntaavuudeltaan. Kaiuttimen A tehovasteessa 1 kHz:n kohdalla näkyvä korostus näkyy myös horisontaalisuunnan suuntaavuus- ja vastekuvaajissa. Kaiuttimien väliset erot muilla taajuusalueilla ovat merkittäviä, mutta tehovasteesta niitä ei ole tulkittavissa.

6 YHTEENVETO

Suuntaavuutta voidaan siis mitata monilla eri tavoilla ja erilaiset suuntaavuudet tuottavat erilaisia kuunteluhavaintoja riippuen myös ympäristöstä riippuen. Suuntaavuutta voidaan kuitenkin hahmottaa erilaisten suureiden ja kuvaajien avulla. Kuitenkin tulkitessa suuntaavuuskuvaajia on samalla huomioitava kunkin kuvaajan heikkoudet jolloin vältetään virhearvioinnit kaiuttimen suuntaavuusominaisuuksissa.

VIITTEET

[1] William Evans, Jakob Dyreby, Søren Bech, Slawomir Zielinski, and Francis Rumsey. Effects of loudspeaker directivity on perceived sound quality - a review of existing studies. In *Audio Engineering Society Convention 126*, May 2009. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14941`.

[2] Floyd E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 2. *J. Audio Eng. Soc*, 34(5):323–348, 1986. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5270`.

[3] Søren Bech. Perception of timbre of reproduced sound in small rooms: Influence of room and loudspeaker position. *J. Audio Eng. Soc*, 42(12):999–1007, 1994. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6917`.

[4] I. H. Flindell, A. R. McKenzie, H. Negishi, M. Jewett, and P. Word. Subjective evaluations of preferred loudspeaker directivity. In *Audio Engineering Society Convention 90*, Feb 1991. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5617`.

[5] Siegfried Linkwitz. The challenge to find the optimum radiation pattern and placement of stereo loudspeakers in a room for the creation of phantom sources and simultaneous masking of real sources. In *Audio Engineering Society Convention 127*, Oct 2009. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15153`.

[6] Kyeong Ok Kang, Philip Nelson, and Munhum Park. Evaluation of stereophonic images with listening tests and model simulations. In *Audio Engineering Society Convention 124*, May 2008. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14593`.

[7] William L. Martens, Sean E. Olive, and Todd Welti. Listener loudspeaker preference ratings obtained in situ match those obtained via a binaural room scanning measurement and playback system. In *Audio Engineering Society Convention 122*, May 2007. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14019`.

[8] Søren Bech. Timbral aspects of reproduced sound in small rooms. i. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3):1717–1726, 1995.

[9] Allen R. Groh. High-fidelity sound system equalization by analysis of standing waves. *J. Audio Eng. Soc*, 22(10):795–799, 1974. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2723`.

[10] Sean E. Olive and William L. Martens. Interaction between loudspeakers and room acoustics influences loudspeaker preferences in multichannel audio reproduction. In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14254`.

[11] Karl Gentner, Jonas Braasch, and Paul Calamia. A perforated desk surface to diminish coloration in desktop audio-production environments. In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14257`.

[12] R Walker. Early reflections in studio control rooms: The results from the first controlled image design installations. In *Audio Engineering Society Convention 96*. Audio Engineering Society, 1994.

[13] Nick Zacharov, Søren Bech, and David J. Meares. The use of subwoofers in the context of surround sound program reproduction. In *Audio Engineering Society Convention 102*, Mar 1997. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7368`.

[14] Günther Thiele and Christoph Kügler. Loudspeaker reproduction: Study on the subwoofer concept. In *Audio Engineering Society Convention 92*, Mar 1992. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6798`.

[15] Floyd E Toole. *Sound reproduction: The acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and rooms*. Routledge, 2017.

[16] Densil Cabrera, Sam Ferguson, and Alan Subkey. Localization and image size effects for low frequency sound. In *Audio Engineering Society Convention 118*. Audio Engineering Society, 2005.

[17] Siegfried Linkwitz. Room reflections misunderstood? In *Audio Engineering Society Convention 123*, Oct 2007. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14220`.

[18] Harry F Olson. *Acoustical engineering*. van Nostrand, 1957.

[19] P. H. Chapelle. The frequency response of loudspeakers: On-axis response or power response? In *Audio Engineering Society Convention 44*, Mar 1973. URL `http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=1738`.

[20] ITU-R BS.1116-1. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems . Standard, International Telecommunications Union, Geneva, CH, February 2015.

[21] Christian Claumarch, Kasper Kiis Jensen, and Mikkel Krogh Simonsen. Design of loudspeaker crossover networks using genetic algorithm. In *Audio Engineering*

Society Convention 143, Oct 2017. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19306.

[22] Rex Sinclair. The dispersion of re-entrant exponential horns. In *Audio Engineering Society Convention 60*, May 1978. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2983.

[23] Martin Møller, Martin Olsen, Finn T. Agerkvist, Jakob Dyreby, and Gert Kudahl Munch. Circular loudspeaker arrays with controllable directivity. In *Audio Engineering Society Convention 128*, May 2010. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15309.

[24] Wolfgang Klippel. Nonlinear system models for horn loudspeakers. In *Audio Engineering Society Convention 99*, Oct 1995. URL http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7683.