

LÄHIKENTTÄKUUNTELU: ÄÄNENTOISTO KUULOKKEIDEN JA KAIUTTIMIEN VÄLIMAASTOSSA

Jukka Linjama

Flexound Systems
Tietäjäntie 2, 02130 Espoo
jukka@flexound.com

Tiivistelmä

Henkilökohtainen äänisisältö on tärkeässä osassa digitalisoituvassa maailmassa, ja usein kuulokkeita saatetaan käyttää suuri osa työpäivästä. Vaihtoehdon kuulokekuunteluun tarjoaa Suomessa kehitetty vibroakustista lähikenttää, *pintalähikenttää*, monipuolisesti hyödyntävä FLEXOUND Augmented Audio™ -ratkaisu¹. Siinä pyritään yhdistämään kuulokkeiden äänen selkeys ja kaiutinkuuntelun luonnollinen tilan tuntu, ja näiden lisäksi hyödyntämään tuntoaistia syvemmän kuuntelukokemuksen luomisessa. Tämä on mahdollista, koska kuuleminen ja kuuntelu ovat tilannesidonnaisia, ja aivot adaptoituvat kuuntelukontekstiin jatkuvasti Kirjoituksessa tarkastellaan kuuntelukokemukseen vaikuttavia tekijöitä ja määritellään lähikentän ominaisuuksia, jotka mahdollistavat hyvän kuuntelukokemuksen eri tilanteissa.

1 JOHDANTO

Musiikki ja muu henkilökohtainen äänisisältö on tärkeä osa arkea kasvavalle joukolle ihmisiä digitaalisessa maailmassa. Liikkuvassa työssä kuulokkeita saatetaan käyttää suuri osa työpäivästä ja vapaa-ajasta. Kuulokkeet tarjoavat hyvän yksityisyyden, tarkan äänen, ja äänisisältö on henkilökohtainen eikä häiritse muita. Kaikille kuulokkeilla kuuntelu ei kuitenkaan ole mielekäästä, joko ergonomiasyistä (hygienia, paino, korville asettaminen), tai sosiaalisen eristyksen takia, kun kuulokkeiden vaimennus ja kuunneltava sisältö peittää alleen ympäristön muut merkitsevät äänisignaalit.

Kuulokkeiden vaihtoehto on äänentoisto kaiuttimilla, jolloin kuuntelutilanne on yhteinen, jaettu, ja ilman henkilökohtaista kontrollia. Taustamelun voimakkuus ja häiritsevyys kuitenkin usein rajoittaa suorituskykyä, erityisesti kulkuneuvoissa – ainoastaan hiljaisissa ja akustoiduissa ympäristöissä, kuten kuuntelusaleissa ja elokuvateattereissa, voidaan hyödyntää äänisisällön koko dynamiikka-alue. Lisäksi kaiunta kaukokentässä heikentää äänen selkeyttä, ja huoneheijastukset sekä huonemoodit värittävät ääntä. Vallitsevan akustiikan ominaisuudet voidaan huomioida kaiuttimien sijoittelulla, suuntakuviolla ja signaalinkäsittelyllä, mutta yleensä vain tiettyyn kuuntelupaikkaan optimoituina. Näistä tekijöis-

¹ www.flexound.com



© 2021 Jukka Linjama. 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.

tä johtuen kuuntelukokemus ja koettu äänentoiston laatu saattaa olla hyvin paljon kuuntelupaikasta riippuva. Tämä pätee niin ulkotiloihin, kuuntelusaleihin kuin kulkuneuvoihinkin.

Kaiutintoiston ja kuulokekuuntelun välissä on kuuntelutilanteita, joita voi kutsua lähikenttäkuunteluksi. Seuraavassa tarkastellaan kuuntelukekomusta yleisemmin, ja pyritään määrittelemään kuulijalla merkityksellisiä lähikentän ominaispiirteitä sekä kuvataan uusia mahdollisuuksia lähikenttä-äänentoistolle.

2 KUULEMINEN JA KUUNTELUKONTEKSTI

Kuuntelukokemusta arvioidessa on hyvä erottaa kuuloaisti tai *kuuleminen* (hearing), sekä *kuuntelu* (listening). Kuuntelu on aktiivista toimintaa, missä huomio ja tarkkaavuus on jossain ääniympäristön piirteissä, vaikkapa häiritsevässä taustamelussa, tai mielentilaan sopivassa musiikissa. Kuuntelu on tilannekohtaista, ja tapahtuu siis kuuntelukontekstissa. [1]. Myös pelkkä kuuleminen itsessään on aktiivista toimintaa, kuten kaikilla muillakin aisteilla tapahtuva hahmotus. Näköaistilla silmän tahdosta riippumattomat sakkadiliikkeet skannaavat näkökentän tarkan näön aluetta jatkuvasti, ja tuntoasti perustuu aktiivisen liikkeen ja tuntoreseptoreiden sensomotoriseen yhteistyöhön. Aistiminen on käytännössä aina moniaistista: aistitieto yhdentyy aivoissa jatkuvasti ja ohjaa huomiota ja eri aistien keskinäistä herkistymistä ja työnjakoa [2]. Puhutaan sensorisesta integraatiosta ja synestesiasta. Kuulo ei ole siis pelkästään korvan asia, vaan kuuloaistimus mukautuu aina kuuntelukontekstiin; esimerkiksi suuntakuuloa tukevat näköhavainnot [1], [3]. Motoriikka ja tuntoaisti tukevat kuulemista monessa suhteessa. Ensinnäkin pään (korvien) liikuttelu tilassa auttaa suuntakuuloa, ja tarkka hahmotus ei ole mahdollista ilman pientä pään kääntelyä. [1]. Toiseksi, tuntoaistin reseptorit iholla ja kehossa ovat herkkiä värähtelyille ja antavat informaatiota sekä suoraan ilmaäänestä että ihokontaktin kautta runkoäänestä korvien lisäksi. Kuulo- ja tuntoaisti ovat mekaanisia aisteja, joiden kautta hahmotamme ympäristön tilaa ja tapahtumia joko suoraan mekaanisessa kosketuksessa tai ilmaäänien kautta välittyneenä.

Ehkä tärkein kuuntelukokemukseen arjessa vaikuttava tekijä on tilanteeseen sopiva äänekkyyys – liian hiljaisena soitettu äänisisältö suhteessa taustameluun ei kuulu. Taustamelun häiritsevyys on vaikeasti määriteltävä suure, johon vaikuttavat muutkin seikat kuin sen äänekkyyys. Joskus häiritsevyys saattaa jatkuvaan tasaiseen meluun verrattuna jopa pienentyä, jos äänen luonne on sopivasti vaihteleva, esimerkiksi aaltoilee hitaasti [4].

Suuntakuulo auttaa hahmottamaan ympäröivän tilan luonnetta [5], esim onko lähellä pinta joka aiheuttaa varjostuman tai heijastuksen, vai ollaanko isossa vapaassa tilassa, jossa heijastukset tulevat kaukaa. Äänikokemuksen elementtejä suuntakuulon kannalta äänisuunnittelussa voidaan kuvata esimerkiksi äänikuva-ajattelulla [6]. Äänikuvalla tarkoitetaan kuulijan kokonaisvaltaista kokemusta tilasta ja siinä olevista äänilähteistä. Pienillä äänen taajuuksilla taas tilan koosta aiheutuvat huonemoodit ovat merkittävä osa äänikokemusta – luonnollisen kuuloinen bassotoisto pitää sisällään huonemoodien aikaansaan heijastekentän. Näin ollen bassotaajuuksilla kuultava taajuustoistokäyrä on luonnostaan kuoppainen, moodien solmukohdassa voi olla jyrkkäkin vaimenema. Vaikka kuuntelutilanne ei ole ideaalinen tasaisen toiston kannalta, kuulojärjestelmä havaitsee tämän kuuntelutilan luonnollisena ominaisuutena ja adaptoituu siihen. Huonemoodien lisäksi lähiheijastukset, vaikkapa salin istuinriveistä, muokkaavat toistoa [7].

3 KAUKOKENTTÄ JA LÄHIKENTTÄ

Teknisesti lähikenttä määritellään epäsuorasti tilanteena, missä ei olla kaukokentässä. [8, s. 61] määrittelee kaukokentän ehdoiksi a) äänenpaineen $1/r$ -riippuvuus äänilähteen etäisyyden funktiona b) suuntakuvio ei muutu etäisyyden funktiona ja c) akustinen impedanssi on likimain tasoallon impedanssi. Käytännössä kaukokenttäapproksimaatio on yksinkertaistettu ideaalitalanne, jossa äänilähteen koko on aallonpituutta pienempi, ja kuunnellaan vapaassa heijastuksettomassa tilassa, ja kuunteluetäisyys on useita aallonpituuksia. Miten määritellä lähikenttä, muutenkin kuin kaukokentän vastakohtana? Huone-tilan heijastukset sellaisenaan jo sotkevat kaukokenttätarkastelun: kuvalähteet interferoivat ja liuskoittavat lähteen suuntakuvion. Vapaassakin kentässä kaiuttimilla stereona kuunneltaessa, kenttä ei ole tiukassa mielessä kaukokenttä interferenssin takia.

Yksi mahdollinen tapa määritellä lähikenttä on, että kuunteluetäisyys on enintään samassa vaiheessa värähtelevän lähdealueen kokoluokkaa, ja heijastuksia ei ole merkittävästi. Tämä tilanne toteutuu ainakin kuulokkeilla kuunneltaessa. Mutta missä vaiheessa siirrytään pois lähikentästä? Yksi raja voisi olla huoneakustinen kaiuntakenttä, kaiuntasäteen rajaama ”huonelähikenttä”. Määritelmänsä mukaan kaiuntasädetä kauempana kuunneltaessa pääosa äänienergiasta tulee huone-tilan heijastuksista, jälkikaiunta-ajan määrittelemällä viiveellä [5]. Sama riippuvuus pätee myös pienillä taajuuksilla huonemoodeihin, ja samansuuntaisten pintojen väliseen tärykaikuun: ne syntyvät viiveellä, ja vaikuttavat äänikokemukseen kaukana lähikentästä.

Lähikentän ilmeinen etu on siis suoran äänen tarkkuus ja selkeys, vapaus huone-tilan vaikutuksesta. Tämän tarkkuuden hyödyntämisen vaikeutena on kuitenkin se, että lähikentässä taajuusvasteen amplitudi ja vaihe saattavat muuttua jyrkästi kuuntelupaikan mukana. Riippuen tilanteesta, pienikin kuuntelupaikan tai pään asennon muutos saattaa muuttaa äänikuvan balanssia: lähteestä kauempana oleva korva kuulee heikomman ja viivästyneen signaalin ja äänikuva siirtyy sen mukana. Erityisesti, mikäli äänilähde (esim. kaiutinelementti) on pienikokoinen, lähellä kuunneltaessa äänikuva saattaa lokalisoitua voimakkaasti lähteen kohdalle.

Onko mahdollista luoda lähikenttä-äänentoisto, jossa äänen lokalisoituminen lähteeseen minimoidaan, ja äänikuva olisi muutenkin pään liikkeiden suhteen robusti? Haittaako stereokuuntelua, jos ääni tulee vaikkapa selkänojasta tai niskatyynystä takaviistosta, toisin kuin perinteisesti on totuttu kuuntelemaan stereokuulokkeilla tai -kaiuttimilla?

4 LÄHIKENTTÄKUUNTELU

Mobiililaitteet ovat tuoneet kaiutin- ja kuulokekuuntelun välimaastoon sijoitettavia kuuntelutilanteita: seurataan elokuvaa tai pelataan, tai pidetään etäkokous laitteen kaiuttimia käyttäen. Kuunnellaan siis enemmän lähikentässä kuin huone-tilassa. Hankaluutena tilanteissa näissä on, että jos taustamelu ei peitä, kuunneltava äänisisältö voi olla hyvin häiritsevää ulkopuolisten, tilanteeseen osallistumattomien kannalta. Muita lähikenttään sijoitettavia äänentoistoratkaisuja ovat erilaiset puettavat kaiuttimet (kuten kaulassa pidettävä neck band-laite²), tai kaiuttimet asennettuna selkänojaan tai niskatukeen. Runkoääni-kaiuttimia (tactile exciters) voidaan käyttää istuimeen asennettuna tuottamaan lähinnä

² https://www.boselatam.com/en_ar/products/speakers/portable_speakers/soundwear-companion.html#v=soundwear_companion_black

bassoääntä ja värinää. Äänitynyissä käytetään pehmeän tyynyn sisälle sijoitettuja pieniä kaiuttimia tai kuulokkeita hiljaiseen kuunteluun. Ne soveltuvat myös musiikin kuunteluun, mutta bassotoisto puuttuu. Käytännössä kaikki perinteiset lähikenttäkuunteluun so-pivat koko äänitaajuuskaistan ratkaisut ovat jonkinlaisia kuulokkeiden, värinälaitteiden tai kaiutintoiston yhdistelmiä.

4.1 Pintalähikenttä: uusi lähestymistapa lähikenttäkuunteluun

FLEXOUND Augmented Audio™ -ratkaisu perustuu lähikentässä kuunteluun, ja hyödyntää myös tuntoaistia, koska pehmeä rakenne mahdollistaa kuulijan koskea kehollaan miellyttävästi äänilähdettä. Tällainen moniastinen (audio-taktiilinen) kuuntelu tuo monia etuja, koska kahden aistikanavan välittämä informaation on enemmän kuin erillisten aistikanavien summa. [2,3]. Tässä esityksessä keskitytään kuitenkin auditiiviseen kokemukseen lähikentässä, ja joihinkin sen erityispiirteisiin. Ratkaisun ydin on niin kutsuttu elastinen värinäelementti EVE [9], kerroksittainen häviöllinen levyrakenne, joka toimii ensisijaisena äänilähteenä, dipolimaisena pintasäteilijänä. Levymäisen, jakautuneen lähdealueen etu on, että sitä voi kuunnella hyvin lähellä äänen lokalisoitumatta voimakkaasti. Näin muodostuvassa ns. *pintalähikentässä* kuunteluetaisyys on paljon pienempi kuin äänilähteen dimensiot, joka seikka erottaa ratkaisun perinteisestä kaiutinkuuntelusta huoneakustisessa lähikentässä vaikkapa äänitarkkaamon monitorikaiuttimilla. Kuulokkeista ratkaisu eroaa taas siinä, että äänilähde ei ole puettava (korvan päällä), vaan voi olla vaikkapa pään tai niskan takana.

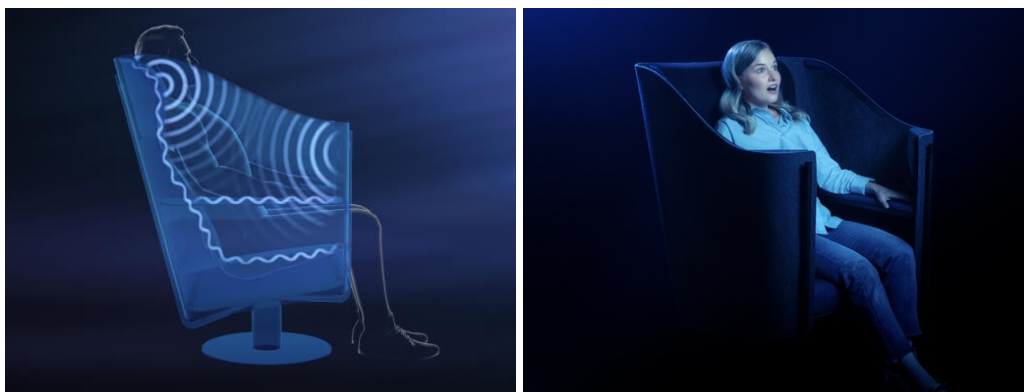
EVE-pohjainen ratkaisu eroaa paneelikaiuttimista (DML, distributed mode loudspeakers) kolmessa mielessä: ensinnäkin levyn taivutus-aaltokentän osalta, joka on häviöllinen toisin kuin DML -toteutuksen diffuusi levykaikumainen kenttä [10]. Toiseksi, taivutusvärähtelevä levydipoli on verhottu huokoisilla (poro-elastisilla) kerroksilla, jotka kuljettavat värähtelyä ja välittävät täyden äänikaistan. Huokoisien pehmeän materiaalin ansiosta värähtely on miellyttävää ja kuulija voi olla kosketuksissa äänilähteen kanssa jolloin EVE elementtiä voidaan kuunnella lähempää kuin perinteistä paneelikaiutinta. Kolmanneksi tyynymäinen EVE voidaan integroida osaksi isompaa rakennetta, esim istuimen selkänojaan, jolloin erityisesti bassotaajuuksilla värähtely välittyy laajempaan pintaan aistittavaksi sekä ilmajohtumisena (ilmäänenä) että kehokontaktin kautta. Tässä tapauksessa voidaan puhua runkoäänen välittymisestä ”kehojohtumisena” (body conduction), joka muistuttaa suurilla äänenpainetasoilla tapahtuvaa ilmäänen ihojohtumista (ilmäänen aistiminen ihon tuntoreseptoreiden kautta).

EVE-toteutusta voisi luonnehtia myös akustiseksi puolijohderakenteeksi, jolle on ominaista, että siinä hyödynnetään häviöllistä akustisen energian johtumista usealla tapaa: mekaaniset häviöt tasaavat säteilijän omia resonansseja, ja tuovat levysäteilijän taivutus-aaltokenttään etenevän aaltorintaman. Huokoisien materiaalin akustiset häviöt tasaavat rakenteen taajuusvastetta ja vaihekäyttäytymistä lisää. Häviöt toki heikentävät akustista hyötysuhdetta verrattuna vapaisiin säteileviin pintalähteisiin, mutta lähikentässä tehontarve on merkittävästi pienempi kaukokenttään verrattuna saman kuunteluvoimakkuuden saamiseksi. Oikein mitoitettuna ratkaisu tuottaa miellyttävän ja luonnollisen oloisen tiläänikokemuksen pintalähikentässä.

Kaiken kaikkiaan, EVE-pohjaisella akustisella puolijohdetoteutuksella saavutetaan hyvä mekaanis-akustinen ”impedanssisovitus” ja sitä kautta lähikenttäkuuntelussa hyvä kokonaishyötysuhde äänilähteestä kuulijan aistireseptoreihin asti. Lähikenttäbasso (myös ilman kehokontaktiakin) on voimakas ja tarkka. Lisäksi tilantuntu on luonnollinen kahdes-

ta syystä: ääni ei juurikaan lokalisoitu yksittäiseen paikkaan, ja koska taivutusaaltokenttä sisältää ikään kuin tilakaikua, joka tekee äänivaikutelmasta luonnollisen. EVE toimii ja-kautuneena äänilähteenä, joka kuulosta hyvin luonnollisesta sellaisenaan, vaikka äänimaisema aistitaan ikään kuin takaviistossa, kun elementti on niskan takana. Äänikuva ikään kuin leviää päätä ympäröiväksi, ja jos päätä ei liikutella, syntyy binauraalinen iluusio ympäröivästä akustisesta tilasta. Mahdollisesti tässä auttaa myös suuntakuulon epätarkkuus erotella suoraan edestä tai takaa tulevia ääniä (front-back confusion) [1,5].

Signaalikäsittelyllä viimeistellään vasteen tasaisuus. Suuntakuviota tai tilan tunnun välitymistä on hankalampi säätää prosessoinnilla, vaikka mm. binauraalista prosessointia voidaan mahdollisesti hyödyntää äänikuvan levittämisessä enemmän myös etuviistoon. Pintalähikentässä kuuntelun erityisluonteesta johtuen tehtävä ei ole suoraviivainen ja vaatii kehitystyötä [11]. Istuimen selkänojaan integroitua EVE-rakennetta voidaan käyttää täydentävänä tuntoaistia hyödyntävänä äänilähteenä tavanomaisen elokuvasalin äänentoistojärjestelmän yhteydessä. Tällöin istuinkohtaisesti voidaan luoda yhteneväinen ääniaistimus sopivasti vaiheistamalla ja miksaamalla äänisignaali salissa olevien kaiuttimien luoman äänikuvan suhteen. Monikanavaisella EVE-ratkaisulla voidaan myös toteuttaa tiläänentoistoratkaisu elokuvakatselua varten ilman perinteisiä kaiuttimia (kuva 1).



Kuva 1. FLEXOUND Pulse™ -istuin, jossa on nelikanavainen lähikentän tiläänentoisto.³

6 POHDINTAA JA YHTEENVETO

Edellä kuvattiin kuuntelukontekstin ja kuuntelun moniaistisen luonteen vaikutusta äänikokemukseen, ja vibroakustisessa lähikentässä tapahtuvan kuuntelun suomia mahdollisuuksia äänentoistossa. Esiteltiin kuuntelutilanne *pintalähikentässä* ja sen eroja perinteiseen kaiutinkuunteluun joko kaukokentässä tai suoran äänen *huonelähikentässä*. Tapauksessa, jossa lähde sijaitsee välittömästi kuulijan takana tai ympärillä, perinteisesti kaukokenttään määritellyt äänilähteen ominaisuudet, kuten suuntaavuus ja taajuusvaste, eivät sellaisenaan ole kovin sopivia. Samoin tuntoaistimuksen huomioiminen matalien taajuuksien toiston määrittelyssä vaatii oman tarkastelunsa. Koska kuuntelu on kuitenkin aina moniaistista ja adaptoituu kuuntelukontekstiin, perinteiset äänisisällön miksaustavat toimivat lähikenttätoistossa jo sellaisenaan. Tulevaisuudessa pintalähikentän mahdollistama tarkka audio-taktilinen äänikokemus voi rikastua entisestään, jos lähikenttäkuuntelun mahdollisuudet otetaan huomioon jo äänisuunnittelussa.

³ <https://www.flexound.com/flexound-pulse>

VIITTEET

- [1] Pulkki, V. & Karjalainen, M. *Communication Acoustics*. Wiley 2015.
- [2] Bundy, A. Lane, S., Murray, E. *Sensory Integration: Theory and Practice*. F.A. Davis, 2nd edition 2002.
- [3] Strohmeier, D. & Jumisko-Pyykkö, S. Audiovisual interaction. In: *Sensory Evaluation of Sound*. Zackharov N. (editor). CRC Press 2019
- [4] Hongisto V., Virjonen P., *Amplitudimoduloidun äänen häiritsevyys ja sanktio*. Akustiikkapäivät 2019, Oulu, 28-29.10.2019. Lokki T (toim).
https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2019/10/akustiikkapaivat_2019.pdf
- [5] Howard, D & Angus, J. *Acoustics and psychoacoustics*. Fifth edition, Routledge 2017.
- [6] Katajamäki, M. *Äänikuvan tulkinta ja analyysi*. Opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu 2017. saatavilla:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/130421/Katajamaki_Miikka.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [7] Tahvanainen, H. *Analysis and perception of the seat-dip effect in concert halls*. Väitös, Aalto Yliopisto, 2021.
<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/110081/isbn9789526405131.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Junger, M. & Feit, D. *Sound, structures and their interaction*, Ac Soc America, 1993.
- [9] Linjama, J. ym. *Äänituntumasoitin akustinen mallintaminen ja simulointi*. Akustiikkapäivät 2017, Espoo 24-25.8.2017. Lokki T (toim). s 351-355.
https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2017/08/akustiikkapaivat_2017_eprosari.pdf
- [10] Heilemann, M. ym, *The Evolution and Design of Flat-Panel Loudspeakers for Audio Reproduction*. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 69, no. 1/2, pp. 27-39, (2021 January.). doi:
<https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0057>
- [11] Puomio, O., Gonzalez, R., and Lokki, T., *Augmented audio with behind-the-head listening device*, In the AES International Conference on Immersive and Interactive Audio, York, UK, March 27-29, 2019.