

ÄÄNILÄHDERYHMIEN TILAJAKAUMAN HAVAITSEMINEN

Olli Santala ja Ville Pulkki

Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
PL 13000, 00076 AALTO
olli.santala@aalto.fi

1 JOHDANTO

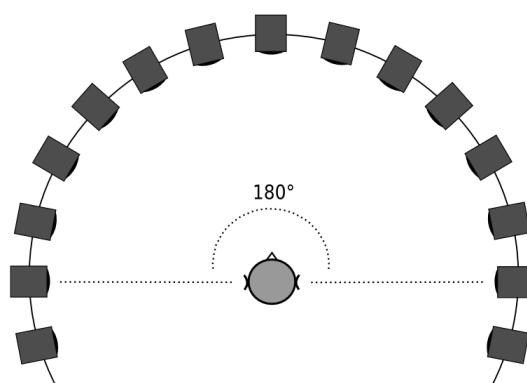
Ihmisen suuntakuulon toimintaa on tutkittu runsaasti käyttäen yhtä äänilähdettä [1], mutta useiden samanaikaisten äänilähteiden havaitsemisesta ei tiedetä yhtä paljon. Tässä artikkelissa tutkitaan ihmisen tilakuuloa kahdessa kuuntelukokeessa, joissa keskitettiin ihmisen kykyyn havaita useita tilassa erillään sijaitsevia samanaikaisesti ääntä lähettäviä äänilähteitä. Ensimmäisessä kokeessa testattiin tilassa laajalle jakautuneiden äänilähderyhmien havaitsemisen tarkkuutta, ja toisessa kokeessa testattiin, kuinka hyvin tilajakauman eroja kyetään havaitsemaan.

Äänilähteiden paikallistamisessa auttavat korvienvälinen aika- ja taajuusero sekä spektrivihjeet. Yksittäisen äänilähteen suunnan havaitseminen on tarkimmillaan suoraan kuulijan edessä [1]. Kahden samanaikaisen äänilähteen erottamistarkkuus vaihtelee samalla tavalla – pienin äänilähteiden välinen kulma, jossa ne havaittiin erillisinä, oli suoraan kuulijan edessä $4^\circ - 10^\circ$ ja 67° kulmassa sivulla $30^\circ - 45^\circ$ [2]. Tilajakauman leveyden havaitsemisesta kaiuttomassa ympäristössä on saatu selville, että havaittu jakauman leveys kasvaa, kun testiäänänen äänipainetaso tai ajallinen kesto kasvaa [3]. Vastaavasti havaittu jakauman leveys pienenee, kun testiäänänen taajuus kasvaa [4]. Tämän artikkelin kuuntelukokeissa äänipainetason ja ajallisen keston vaikutus eliminoitiin pitämällä ne vakioina, kun taas taajuussisällön vaikutusta tutkittiin lisää. Tarkemmin tässä artikkelissa esitellyistä kuuntelukokeista kerrotaan viitteessä [5].

2 MENETELMÄT

Kumpaankin kokeeseen osallistui kymmenen vapaaehtoista koehenkilöä. He olivat 25-36 -vuotiaita eikä kenelläkään ollut todettua vikaa kuulossa. Neljä henkilöistä oli samoja molemmissa kokeissa. Kokeet suoritettiin kaiuttomassa huoneessa. Kokoonpanossa oli viisitoista kaiutinta, jotka oli asetettu ympyrän kaarelle koehenkilön pään korkeudelle 15 asteen välein kuvassa 1 esitetyllä tavalla. Kukin kaiutin oli yhtä kaukana koehenkilöstä. Kokeessa käytettiin todellisuudessa vain kolmeatoista kaiutinta, ja reunimmat olivat mukana, jotta koehenkilöiden olisi mahdollista merkitä havaintojaan todellisen äänilähteen kummalle puolelle tahansa.

Ensimmäisessä kokeessa tarkoituksena oli testata yksityiskohtien havaitsemisen tarkkuutta äänilähteiden tilajakaumassa. Testiäänänenä käytettiin korreloimatonta pinkkiä kohinaa. Testitapauksina oli yhteensä 21 erilaista kaiutinkokoonpanovaihtoehtoa, jotka



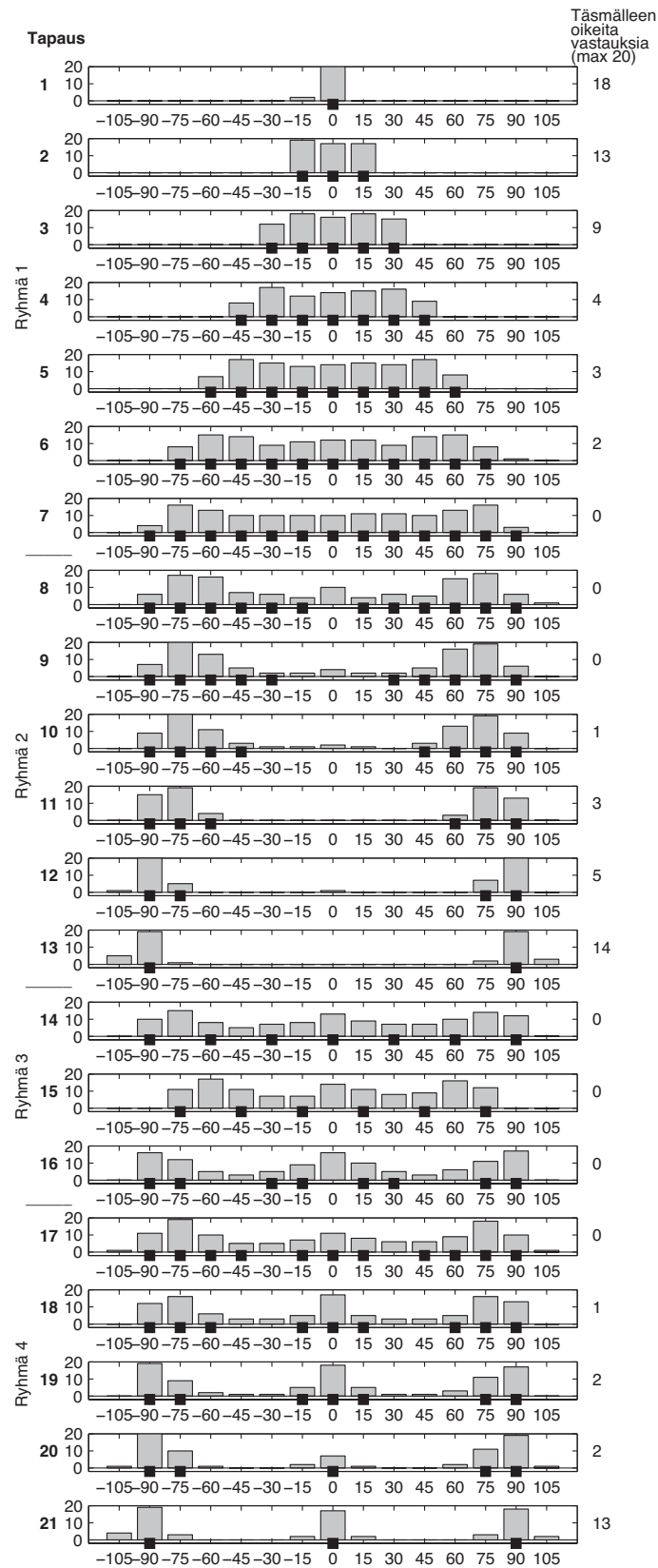
Kuva 1: Kuuntelukokeissa käytetty kaiutinkokoonpano. Viidestätoista kaiuttimesta käytettiin todellisuudessa kolmeatoista, ja ne täyttivät 180° leveän alueen koehenkilön edessä horisontaalitasossa.

esitettiin kullekin koehenkilölle kahteen kertaan satunnaisessa järjestyksessä. Kussakin testitapauksessa yhden sekunnin mittaista testiääntä ja yhden sekunnin taukoa toistettiin vuorotellen, kunnes koehenkilö antoi vastauksensa. Koehenkilöille kerrottiin, että mikä tahansa kaiutinyhdistelmä on mahdollinen, ja tehtävänä oli merkitä ne kaiuttimet, joista koehenkilön havainnon mukaan tuli ääntä. Pään kääntämistä lukuunottamatta liikkuminen ei ollut sallittua.

Toisessa kokeessa testattiin kykyä havaita tilajakauman eroja erilaisilla kaiutinkokoonpanoilla sekä taajuussisällön vaikutusta tähän havaintokykyyn. Testiääninä käytettiin korreloimatonta kohinaa viidellä eri kaistanleveydellä neljästä oktaavista 1/12-oktaaviin kahdella eri keskitaajuudella, jotka olivat 500 ja 4000 Hz. Lisäksi mukana oli valkoista ja ruskeaa kohinaa. Referenssinä käytettiin 13 kaiuttimella soitettua ääntä, joka oli taajuussisällöltään sama kuin testattava ääni. Tätä verrattiin eri kaiutinkokoonpanoihin, joissa oli 1-7 kaiutinta. Koehenkilöiden tarkoituksena oli keskittyä tilavaikutelmaan. Testissä kuultiin ensin referenssi ja sitten vertailtavat äänet A ja B, joista satunnaisesti toinen oli varsinainen testiääni ja toinen piilotettu referenssi. Tämä toistettiin kahteen kertaan, minkä jälkeen koehenkilön tuli antaa vastauksensa. Kummankin äänen (A ja B) tilavaikutelmaa verrattiin erikseen referenssin tilavaikutelmaan asteikolla 1-5, missä 1 vastasi arviota "hyvin erilaiset" ja 5 "mahdotonta erottaa toisistaan". Näistä laskettiin arvo, joka kertoo piilotetun referenssin ja testiäänien arvioiden eron.

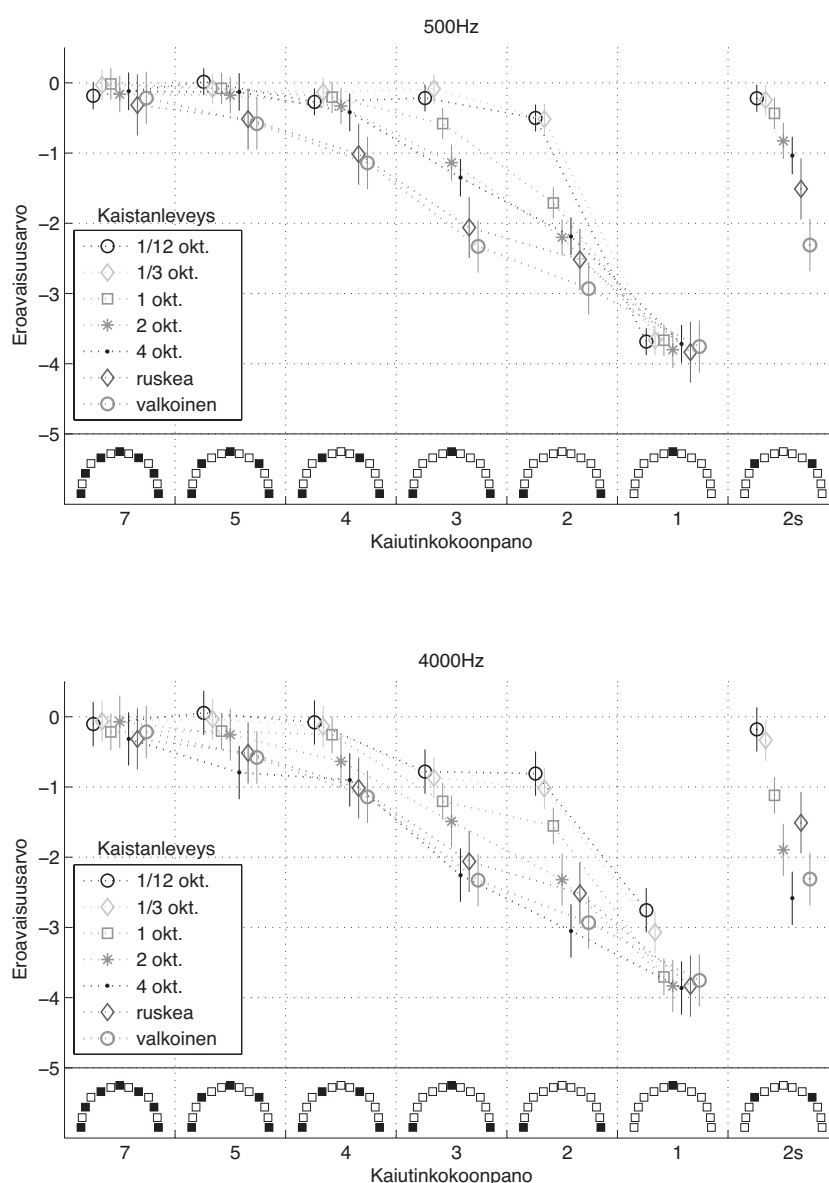
3 TULOKSET

Ensimmäisen kuuntelukokeen tulokset on esitetty kuvassa 2. Kussakin tapauksessa mustilla neliöillä on merkitty ne kaiuttimet, jotka olivat päällä, ja y-akselilla olevan harmaan palkin korkeus kertoo, kuinka monta kertaa kyseinen kaiutin merkattiin. Numerot x-akselilla kertovat kulman, jossa kyseinen kaiutin oli. Oikeassa laidassa olevat numerot kertovat täsmälleen oikeiden vastausten lukumäärän kussakin tapauksessa. Tuloksia analysoitiin Kolmogorov-Smirnov (K-S) -testillä, jolla selvitettiin, olivatko eri testitapauksien vastaukset samasta vai eri jakaumasta. Samankaltaisuutta löydettiin muutamien testitapauksien välillä, joista puhutaan tarkemmin kappaleessa 4. Lisäksi analyysillä saatiin selville, että koehenkilöt eivät vastanneet satunnaisesti.



Kuva 2: Ensimmäisen kuuntelukokeen kaikkien 21 testitapauksen tulokset neljään ryhmään jaoteltuna.

Toisen kuuntelukokeen tulokset on esitetty kuvassa 3. Eri kaiutinkokoonpanot on esitetty x-akselilla ja eroavaisuusarvo y-akselilla. Eri kaistanleveyksiä edustavat käyrät on jaettu kahteen kuvaan kohinan keskitaajuuden mukaan. Lisäksi valkoinen ja ruskea kohina on vertailun helpottamiseksi esitetty molemmissa kuvissa. Kun eroavaisuus saa arvon 0, se tarkoittaa, että testiääni ja piilotettu referenssi havaittiin samanlaisina suhteessa referenssiin, ja arvo -4 taas tarkoittaa, että testiääni arvioitiin hyvin erilaiseksi verrattuna referenssiin ja piilotettu referenssi arvioitiin samanlaiseksi kuin referenssi. Tulokset analysoitiin käyttäen varianssianalyysiä (ANOVA), jonka mukaan kaiutinkokoonpanolla ja kohinatyyppillä oli merkittävä vaikutus eroavaisuusarvoon.



Kuva 3: Toisen kuuntelukokeen tulosten keskiarvot ja 95% luottamusvälit jaettuna eri kuviin keskitaajuuden mukaan siten, että kaistanpäästettyjen kohinoiden keskitaajuudet ovat 500 Hz yläkuvassa ja 4000 Hz alakuvassa. Valkoisen ja ruskean kohinan tulokset ovat mukana molemmissa kuvissa.

4 DISKUSSIO

Ensimmäisen kuuntelukokeen ensimmäisessä testitapausrhmässä testattiin äänilähteen tilajakauman leveyden havaintotarkkuutta. Tapaukset, joissa oli yksi, kolme tai viisi kaiutinta, havaittiin melko tarkasti. Kun kaiutinkokoonpanon tilajakauma oli leveämpi kuin seitsemän kaiutinta, havainto oli kapeampi kuin todellinen jakauma; reunimmaisten kaiuttimien ei tyypillisesti havaittu lähettävän ääntä tapauksissa 5-7. Sen sijaan reunojen havaittiin olevan yhden kaiuttimen verran keskemällä kuin ne olivat. Lisäksi tapauksesta 7 on nähtävissä, että keskialueella olevia kaiuttimia ei merkattu yhtä usein kuin reunoilla olevia. Koehenkilöiden mukaan leveiden jakaumien tapauksessa oli haastavaa erottaa, mitkä keskimmaisista kaiuttimista lähettivät ääntä.

Toisessa ryhmässä testattiin äänilähderyhmässä olevan aukon havaitsemista. Tulokset osoittavat, että aukko havaittiin leveämpänä kuin se oli. Kääntäen voidaan sanoa, että kaksi samanaikaisesti esitettyä tiheää äänilähderyhmää havaittiin kapeampina kuin ne olivat. Tapauksia 7 ja 8 tarkastellessa huomataan, että yhden kaiuttimen ero kokoonpanossa vaikutti havaintoon – myös K-S -testi osoitti tapausten olevan tilastollisesti erilaisia. Aukkoa ei kuitenkaan havaittu tarkasti, sillä tapauksessa 8 keskimäinen kaiutin merkittiin useammin kuin sen vieressä olevat kaiuttimet, vaikka se ei ollut päällä.

Kolmannessa ryhmässä oli monimutkaisia tilajakaumia. Tuloksista nähdään, että havainnot eivät vastaa todellista jakaumaa, sillä koehenkilöt merkitsivät usein kahden ääntä lähettävän kaiuttimen välissä olevan hiljaisen kaiuttimen. K-S -testi osoitti, että tapauksien 7 ja 15 sekä 6 ja 15 havainnoissa oli samankaltaisuutta, vaikka tapauksissa 6 ja 7 jokainen kaiutin lähetti ääntä ja tapauksessa 15 vain joka toinen. On selvää, että koehenkilöt eivät kyenneet havaitsemaan kolmannessa ryhmässä esitettyjä pieniä yksityiskohtia tilajakaumassa. Neljännessä ryhmässä testattiin kolmen samanaikaisen äänilähderyhmän – tai kääntäen kahden jakaumassa olevan aukon – havaitsemista. Tulokset olivat samankaltaisia kuin toisessa ryhmässä kahden samanaikaisen äänilähderyhmän tapauksessa: äänilähderyhmät havaittiin kapeampina kuin ne todellisuudessa olivat.

Keskimääräinen merkittyjen kaiuttimien määrä oli useimmissa tapauksissa pienempi kuin ääntä lähettävien kaiuttimien määrä. Enimmilläänkin koehenkilöt merkitsivät keskimäärin alle seitsemän kaiutinta. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että koehenkilöt eivät havainneet erikseen kaikkia ääntä lähettäviä kaiuttimia. Kuvan 2 oikeassa laidassa on merkittynä täsmälleen oikeiden vastausten lukumäärä eri testitapauksissa. Monimutkaisemmissa tapauksissa yksikään 20 vastauksesta ei ollut täsmälleen oikein. Koehenkilöt suoriutuivat tässä mielessä hyvin vain niistä tapauksista, joissa on samanaikaisesti yksi, kaksi tai kolme ääntä lähettävää kaiutinta. Toisin sanottuna havaitseminen muuttuu epätarkaksi, kun yli kolme kaiutinta on samanaikaisesti päällä. Tulokset ovat verrannollisia johdannossa esitelyihin tuloksiin viitteestä [2].

Toisen kuuntelukokeen tulokset osoittavat, että yleisesti ottaen havaittu tilavaikutelma verrattuna 13 kaiuttimen tuottamaan tilavaikutelmaan on sitä erilaisempi, mitä vähemmän kaiuttimia oli käytössä. Poikkeuksena tähän olivat kuitenkin pienet kaistanleveydet sekä stereokaiutinasetteluun kaltainen kaiutinkokoonpano 2s. Tulosten avulla selvitetään, kuinka monta kaiutinta tarvitaan samankaltaisen tilavaikutelman aikaansaamiseen kuin mitä 13 kaiuttimella tuotettiin. Tulokset osoittavat, että havainto oli lähes saman-

lainen referenssiin verrattuna käytettäessä seitsemää, viittä tai neljää kaiutinta. Eniten eroavaisuutta havaittiin valkoisella ja ruskealla kohinalla sekä neljän ja kahden oktaavin kaistanleveyksillä eli suurimmilla kaistanleveyksillä. Pienimmillä kaistanleveyksillä jopa kolmen tai kahden kaiuttimen kokoonpanot havaittiin varsin samanlaisina kuin 13 kaiuttimen kokoonpano. Yleisesti ottaen eroavaisuusarvo muuttui merkittävästi vasta, kun kaiuttimien määrä vähennetään kolmeen. Kahta kaiutinta käytettäessä tilavaikutelma oli lähempänä 13 kaiutinta kokoonpanossa 2s eli silloin, kun kaiuttimet oli asetettu $\pm 45^\circ$ kulmaan verrattuna siihen, että kaiuttimet olivat reunoilla $\pm 90^\circ$ kulmassa. Keski-taajuuksia verrattaessa voidaan sanoa, että 4000 Hz:n keskitaajuudella havaittiin enemmän eroja kuin 500 Hz:n keskitaajuudella. 500 Hz:n tapauksessa pienimmillä kaistanleveyksillä vain yhden kaiuttimen kokoonpanon eroavaisuusarvo oli merkittävästi erilainen muihin kaiutinkokoonpanoihin verrattuna.

Yleisesti ottaen äänilähderyhmien tilajakauman havaitsemisesta tulee haastavampaa, kun jakauman monimutkaisuus lisääntyy. Kun kaistanleveys on suuri, kolme tilassa erillään sijaitsevaa kaiutinta voidaan havaita erikseen, mutta kapeammilla kaistanleveyksillä havaitsemisesta tulee haastavampaa. Voidaan sanoa, että havaitsemisen tarkkuuteen vaikuttaa sekä äänilähteiden jakauma että kaistanleveys.

4.1 Kiitokset

Tätä tutkimusta ovat tukeneet Suomen Akatemia, Emil Aaltosen säätiö sekä Nokia Säätiö. The research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) / ERC grant agreement n° [240453].

VIITTEET

- [1] BLAUERT J, *Spatial Hearing*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA, revised edition, 1997.
- [2] PERROTT D, Discrimination of the spatial distribution of concurrently active sound sources: Some experiments with stereophonic arrays, *J. Acoust. Soc. Am.*, **76**(1984) 6, 1704–1712.
- [3] PERROTT D & BUELL T, Judgments of sound volume: Effects of signal duration, level, and interaural characteristics on the perceived extensity of broadband noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**(1981) 5, 1413–1417.
- [4] MASON R, BROOKES T, & RUMSEY F, Frequency dependency of the relationship between perceived auditory source width and the interaural cross-correlation coefficient for time-invariant stimuli, *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**(2005) 3, pt. 1, 1337–1350.
- [5] SANTALA O & PULKKI V, Directional perception of distributed sound sources, *J. Acoust. Soc. Am.*, **129**(2011) 3, 1522–1530.