Teknillinen korkeakoulu
Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
S-89.154 Äänenkäsittelyn seminaari, syksy 1996

Binauraalinen äänitys ja toisto kuuntelukokeita varten

Panu Maijala, SN

37847W

8. marraskuuta 1996

Binauraalinen äänitys ja toisto kuuntelukokeita varten

Panu Maijala
Teknillinen korkeakoulu
Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio

`pantse@iki.fi`

Tiivistelmä

Tieteellisessä tutkimuksessa kokeiden toistettavuus on tärkeä tekijä. Yleensä tällainen tilanne on järjestettävissä vain laboratorio-olosuhteissa. Psykoakustiikan tutkimuksen tarvitsemat hyvin hallitut ja tunnetut (mitattavissa olevat) äänitapahtumat ovat helposti toteutettavissa synteettisesti. Joskus on tarvetta toistaa myös todellisia, reaalimaailman kuulotapahtumia, kuten puhetta, luonnonääniä, musiikkia tai melua. Se, että äänitetään tavanomaisesti mikrofonilla tai stereomikrofoniparilla ei enää riitä tutkimukselle, sillä tiedetään, ettei sellaisen signaalin kuuleminen hyvälläkään laitteistolla vastaa täysin todellista kuulotapahtumaa. Aito kuuloilluusio on toistettavissa vain synnyttämällä kuulijan tärykalvoille täsmälleen samat äänipainesignaalit, jotka siellä olisivat vallinneet todellisessa tilanteessa. Binauraalinen äänitys- ja toistotekniikka mahdollistavat tämän. Tässä seminaarityössä on syvennytty binauraaliseen äänitykseen ja mahdollisimman autenttiseen toistoon kuuntelukokeita varten. Asiaan on otettu sekä signaalinkäsittelyn että akustiikan aspektit.

1. JOHDANTO

Musiikin kuuntelu erinomaisilta äänitteiltä voi olla upea elämys. Entäpä jos se olisi niin luonnollinen ja realistinen, että kuulija voisi auraalisesti siirtyä tilaan, jossa muusikot esiintyvät? Binauraalinen äänitys ja toisto tekevät sen täysin mahdolliseksi, eikä se vaadi kuuntelutilanteessa muuta erityisvälineistöä kuin tavalliset stereokuulokkeet. Binauraalinen tarkoittaa “kaksikorvaista kuulemista”. Ainut yhtäläisyys tavallisen stereotoiston kanssa on kahden kanavan käyttäminen auraalisen informaation välityksessä.

Binauraalinen tekniikka on paljon vanhempaa kuin stereotekniikka, sillä se tunnettiin jo neljä vuotta gramofonin keksimisen jälkeen. Sitä käytettiin ensimmäisen kerran oopperan äänittämisessä Pariisin oopperatalon lavalta 1881. Keksijä Clement Ader käytti näyttämön poikki asetettuja hiilimikrofonipareja. Signaalit hän miksasi kahteen erilliseen puhelinlinjaan, jotka menivät kuulijoiden koteihin. Kuuntelijoilla piti olla kaksi puhelinta kullakin ja heidän piti pistää kummankin kuulokkeet korviinsa. Yhdysvaltojen ilmavoimat käyttivät hyperbinauraalisia kuulotorvia ensimmäisessä maailmansodassa vihollisen lentokoneiden paikallistamisessa. Vuonna 1920 kokeiltiin ensimmäisen kerran binauraalisia radiolähetyksiä, jotka käyttivät kahta taajuutta. Kuulijat virittivät kaksi kidevastaanotinta niiden taajuuksille. Vuoden 1939 World’s Fair -tapahtuman kiinnostavin näyttelyesine oli keinopää "Oscar". Ihmiset saivat kuunnella kuulokkeilla, mitä tapahtui huoneessa, jossa Oscar oli (Sunear, 1996).

Binauraalinen tekniikka pohjautuu perusoletukseen, jonka mukaan äänipainesignaalit kummallakin tärykalvolla ovat fysiologisesti riittävä heräte auditoriselle järjestelmälle. Ne on hyväksytty kaiken kuulotutkimuksen perusherätteiksi, sekä fysikaalisessa että auditorisessa mielessä (Blauert et al., 1993).

Lokalisaatioinformaatio muodostuu oikeaan sekä vasempaan korvaan tulevan äänen taajuuden, amplitudin ja vaiheen eroista. Mikäli signaalia ei muokata, binauraalinen äänitys vaatii toistovälineeksi stereokuulokkeet. Mikäli halutaan toistaa binauraalisella äänitystekniikalla äänitetty äänite stereokaiuttimilla, puhutaan *transauraalisesta* toistosta. Äänitetty signaali prosessoidaan kompensoimaan kaiuttimien ja kuulokkeiden väliset erot, kuten korvien välinen ylikuuluminen ja taajuusvasteen epäideaalisuudet.

Kuuntelukokeet ovat yksi psykoakustiikan keinoista tutkia aistimuksia eli kuulijan subjektiivisia reaktioita ärsykkeisiin, objektiivisesti mitattaviin fysikaalisiin ääniherätteisiin ja näihin liittyviin ympäristötekijöihin. Binauraaliset äänitteet ovat nousemassa yhdeksi tärkeimmistä kuuntelukokeiden herätesignaaleista.

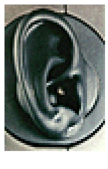
2. KÄSITTEITÄ

2.1 Keinopää

Useimmat binauraaliset äänitykset tehdään keinopäällä (dummy head, artificial head, head simulator, Kunstkopf), joka on tehty täysikasvuisen aikuisen pään mittojen mukaan (kuvassa S.1. hyvin pelkistetty malli). Siinä pyritään toistamaan mittojen ja yksityiskohtien lisäksi ihon pehmeys ja luun kovuus.

S.1. Neumann KU-100 on edullinen keinopää, jota käytetään paljon musiikki- ja luontoäänitteisiin.

Eräs tutkija käytti pitkään oikeita ihmisen pääkalloja, mutta päätyi lopulta synteettisiin materiaaleihin niiden helpomman työstettävyyden vuoksi (Sunear, 1996). Joissakin keinopäissä on mukana olkapäät ja monilla on hiukset. Kaikilla yksityiskohdilla on vaikutusta mikrofoneihin saapuvaan ääneen. Moniin keinopäihin on saatavana ihmiskorvan akustista impedanssia jäljittelevät silikoniseoksesta valmistetut korvat (kuva S.2.).

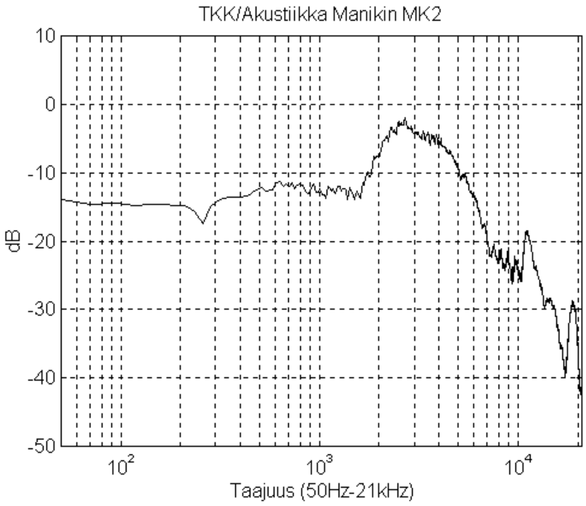


S.2. Yksityiskohta: eräiden keinopäiden korvat pyrkivät jäljittelemään ihmiskorvaa myös materiaalin osalta.

Mikrofonit ovat yleensä pienet suuntaamattomat kondensaattorimikrofonit sijoitettuna korvakäytävän suulle tai lähelle. Joissakin malleissa mikrofonit on sijoitettu tärykalvon paikalle korvakäytäviin. Kalleimmissa malleissa mikrofonisignaaleille tehdään ekvalisointi korjaamaan äänen kaksinkertainen siirtyminen korvakäytävän läpi - ensin äänitettäessä ja sitten toistettaessa. Kaikissa tapauksissa tavoitteena on säilyttää ihmisen kuuloaistin vaatimuksia vastaava lokalisaatioinformaatio.

2.2 HRTF

HRTF (engl. head-related transfer function) on vapaan kentän siirtofunktio tietystä pisteestä korvaan. HRTF:ien ansiosta - riippuen tulevan äänen suunnasta - aivoille tulee signaali, joka muuttuu voimakkuudeltaan sekä taajuussisällöltään (kuvassa S.3. erään keinopään HRTF yhdestä suunnasta). Korvan harjanteet sekä kaikki muutkin pään ja olkapäiden ominaisuudet toimivat kuten monitaajuusselektiiviset suotimet, jotka on viritetty jokaisen ympäristömme äänen tulokulmalle niin sivusuunnassa kuin pystysuunnassakin. Aivot pystyvät paikallistamaan tulevan äänen pienestäkin muutoksesta taajuussisällössä, vaiheessa tai voimakkuudessa.



S.3. Erään keinopään vasemman korvan HRTF nollakulmassa ilman ikkunointia ja pehmennystä. Ainoastaan mittauslaitteiston vaikutus (lähinnä kaiuttimen epäideaalisuus) on kompensoitu pois.

2.3 Tilakuuleminen

Binauraalisista äänitteistä voidaan helposti rekonstruoida äänitystapahtuman akustinen tilanne. Niistä saadaan selville äänittävän pään asento ja suhde äänilähteisiin, sekä sopivilla äänisignaaleilla voidaan mallintaa koko tila. Tyypillisiä sovelluksia ovat äänilähteen paikan ilmaisimet, työkalut huoneakustiikan arviointiin ja äänijärjestelmiin kuten tilavuusmittarit, kaiunilmaisimet, Haasin efektin ilmaisimet sekä välineet psykoakustiikan tutkimukseen. Esimerkiksi tilantuntua arvioidaan korvienvälisen ristikorrelaation (IACC) avulla (Soulodre, G. A., 1993). Lisäksi merkittävä työkenttä on tuotteen äänen suunnittelu. Tähän arviointiin käytetään *binauraalisia psykoakustisia tunnuslukuja*.

2.4 Binauraaliset psykoakustiset tunnusluvut

Binauraalisiin psykoakustisiin tunnuslukuihin luetaan kuuluviksi mm. binauraalinen äänekkyys, vaihteluvoimakkuus, äänen korkeus, terävyys ja karheus. Binauraalisista auditorisista malleista johdetut algoritmit antavat jo varsin hyviä estimaatteja näistä tunnusluvuista. Tämänkaltaisille työkaluille on kysyntää mm. äänenlaadun arvioinnin alueella. Kaikkein haastavin kenttä binauraalisille auditorisille malleille on kuitenkin äänisignaalien erottaminen toisistaan ja niiden vahvistaminen toisiin ääneksiin verrattuna samassa äänikentässä. Avainsana näille sovelluksille voisi olla *binauraalinen signaalien ehostaminen* (engl. binaural signal enhancement).

2.5 Binauraalinen signaalien ehostaminen

Hyvin tunnettu termi binauraalisen signaalien ehostamisen yhteydessä on ns. "cocktail-party efekti", jonka mukaan normaalikuuloiset ihmiset (binauraalisen kuulemisen avulla) voivat keskittyä tiettyyn äänilähteeseen vaikka tilassa olisi muitakin yhtä voimakkaita herätteitä. Tietenkin tämä on jossain määrin mahdollista monauraalisen kuulemisenkin avulla, mutta binauraalisesti se on monin verroin tehokkaampaa.

"Bochum" -versiossa "cocktail-party"-prosessorista eli algoritmista, joka vahvistaa puhetta kyseisessä tilanteessa, käytetään kuulon binauraalista mallia kontrolloimaan Wienersuodinta (Bodden, 1993),(Bodden et al, 1992.). Tämä on toteutettu määrittämällä ensin halutun puhujan paikka tilassa ja arvioimalla sen signaalikohinasuhdetta muihin puhujiin sekä taustameluun nähden. Järjestelmä suorittaa laskennan kriittisillä kaistoilla. Kahden puhujan tilanteessa saadaan haluttu signaali kohtuulliselle ymmärrettävyystasolle jopa siinä tilanteessa, että se on 15 dB pienemmällä tasolla kuin kilpaileva äänilähde. Sovelluksia tällaiselle järjestelmälle on lukuisia, kuten työkalut binauraalisten signaalien editointiin, kuulokojeet, puheentunnistus sekä "hands-free" -puhelimet. Esimerkiksi binauraalista signaalien ehostamista voidaan käyttää parempien "mikrofonien" valmistamiseen akustisesti huonoihin tiloihin.

2.6 Transauraalisuus

Termi "binauraalinen" edellyttää, että äänentoistojärjestelmänä on stereokuulokkeet. Kun samaa äänitystä aiotaan toistaa stereokaiuttimilla, käytetään termiä "transauraalinen". Kaiutinkuuntelussa tulee ongelmaksi kanavien ylikuuluminen. Tämä voidaan ehkäistä esimerkiksi käyttämällä minimivaiheisia suotimia (Cooper et al., 1989) tai lisäämällä alkuperäiseen signaaliin ekvalisoinnin lisäksi keinotekoinen "ylikuuluminen" (Møller, 1989). Menetelmää käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.5.3. Helpoin toteutus transauraaliselle järjestelmälle on kaiuton tila ja tarkalleen määrätty kuuntelupaikka. Lähikenttäkaiuttimien käyttämistä toistoon on myös tutkittu (Salava, T.).

2.6.1 Stereoäänityksen ja binauraalisen äänityksen ero

Stereoäänityksessä mikrofonit ovat yleensä sijoitettuna paljon kauemmaksi toisistaan kuin keskimääräinen korviemme välimatka (7 tuumaa tai 17-18 cm). Tällöin kanavien välinen viive ei vastaa todellisuutta. Myöskään mukana ei ole HRTF:t aiheuttavia korvalehteä, hartioita ja pääkalloa välissä.

3. BINAURAALINEN KUULEMINEN

3.1 Binauraalisen kuulemisen akustiikkaa

Ihmisillä, kuten useimmilla selkärankaisilla, on kaksi korvaa suunnilleen samalla korkeudella kummallakin puolella päätä. Fyysisesti korvat ja pää muodostavat monimutkaisen ja erityiset siirto-ominaisuudet omaavan antennijärjestelmän, joka vastaanottaa väliaineessa - yleensä ilmassa - eteneviä pitkittäisiä ääniaaltoja. Koska se on fyysinen rakennelma ja äänen eteneminen on lineaarinen prosessi (norm. olosuhteissa), voidaan systeemiä pitää lineaarisena. Siksi sitä voidaan simuloida. Itse asiassa simulointi on eräs binauraalisen teknologian tärkeimmistä osa-alueista.

Ottamalla tuleva ääniaalto herätteeksi ja äänipaineet kummankin korvan tärykalvolla lähtösignaaliksi voidaan järjestelmää kuvata samaan herätteeseen kytketyiksi kahdeksi itsesäätyväksi suodattimeksi, mikä tarkoittaa, että suodattimien siirtofunktio on aaltorintaman suunnan ja korvat-pää -antennin kulmasta riippuvainen.

3.1.1 *Spatiaalisen informaation säilyminen ja mikrofonin sijoitus*

Äänen siirtyminen korvakäytävän suulta tärykalvolle on äänen tulosuunnasta riippumaton ja myös korvakäytävän suu voi toimia äänityspaikkana (Møller, 1992). Tämän todistus on johdettu myös *suljetun* korvakäytävän suulta tallennetulle äänipaineelle, joka on käytännöllisempää kuin tärykalvon läheltä (Hammershøi, 1996), (Møller, 1995/1). Äänitystilannetta vastaavan ekvalisoinnin ja oikean kalibroinnin jälkeen voidaan toistaa äänipaineet tärykalvolla riippumatta äänityspaikasta. Mikrofoni voi olla jopa muutaman millimetrin korvakäytävän aukon ulkopuolella (Hammershøi et al., 1991).

Äänitettäessä suljetun korvakäytävän suulta on toistoketju kalibroitu oikein, kun signaali ekvalisoidaan siten, että siirtofunktio mitattuna kuulokkeiden signaalista vastaa suljetun korvakäytävän suulla vallitsevan äänipainesignaalin siirtofunktiota (Hammershøi, 1996). Tämä edellyttää, että kuulokkeiden korjaussuotimet tulee suunnitella mittaamalla vasteet suljetulta korvakäytävältä. Yksilöiden väliset erot vaikuttavat kaikkein vähiten suljetun korvakäytävän suulta mitattujen siirtofunktioiden mukaan suunniteltuihin korjaussuotimiin (Møller, 1992). Mittausmikrofonin voi valaa yksilöllisesti muotoiltuihin korvatulppiin, joka poistaa suuren joukon tarkistusmittauksia, sillä mikrofonin sijoitus on tarkasti toistettavissa eri mittauskertoina.

3.2 Binauraalisen kuulemisen psykologiaa

Useimmissa välikorvan malleissa on herätesignaaliin pohjautuva, alhaalta-ylös rakenne. Tuloksena saadaan (muuttuva) binauraalisen tiedon (binauraalisen aktiviteetin) malli, joka toimii sitten aivokuorelle (cortex) menevänä herätteenä. Tämän binauraalisen aktiviteetin mallin evaluointia voidaan kuvitella ylhäältä-alas, mielikuviin perustuvana prosessina. Tämän ajattelumallin mukaan aivokuorella muodostetaan mielikuva käsittäen odotettua havainto-objektia ja sitten yritetään sovittaa tätä havaittuun objektiin hahmontunnistuksen keinoja apuna käyttäen. Muodostaessaan mielikuvaa aivokuori tuottaa havainnon opitulla tietämyksellä ja kokemuksella, joka vastaa kyseistä tilannetta. Lisäksi se ottaa huomioon herätteet muilta aisteilta, kuten näkö- ja tuntoaisteilta. Muodostettuaan mielikuvan korkeammalla hermostotasolla voi syntyä kontrollointitoiminteita mielikuvan testaukseksi, esimerkiksi pään liikettä.

Seuraavat kaksi esimerkkiä tuovat esiin joitakin binauraaliseen tekniikkaan liittyviä teknisiä ongelmia. Ensinnäkin, “cocktail-party”-tilanteessa ihminen voi seurata yhtä kuulijaa ja sitten välittömästi kääntää huomionsa toiseen. Kuulolaitteen tulisi kyetä tekemään sama käyttäjänsä ajatuksesta. Toiseksi, konserttisalien akustiikan laadun mittauslaitteiston tulisi ottaa huomioon psykoakustiset tunnusluvut kuten tilantuntu, kaikuisuus ja ilmavuus. Kuitenkin, yleinen tilantuntu ja -laatu, joka kuulijalle syntyy huoneessa, saattaa olla biasoitu visuaalisten signaalien vuoksi: tietynlainen esitys, kuulijan ennakkoluulot, tekijät kuten muoti ja maku esimerkkeinä.

Aivokuoren osallistuminen tulkintaan lisää huomattavasti subjektiivisuutta binauraaliseen kuulemiseen. Tämä aiheuttaa luonnollisesti suuria ongelmia koko tekniikalle. Insinöörit ja useimmat tiedemiehet, ovat tottuneet käsittelemään kohteita havaitsijasta riippumattomina (objektiivisuuden mielikuva) ja mielellään jättävät sellaiset ilmiöt, joita ei voida mitata tai arvioida puhtaasti objektiivisesti, huomioimatta. Lisäksi heillä on taipumus pilkkoa jokainen ongelma pieniksi yksityiskohdiksi ja analysoida osia erikseen. Aivokuoritasolla, kuitenkin, käsittelemme havaintoja eli kohteita, joita ei ole olemassa, erillisinä kokonaisuuksina ja osana koehenkilö-tutkija (havaitsija-havainto) suhdetta. Lisäksi tulisi ottaa huomioon, että ihmiset tavallisesti kuuntelevat “gestalt”-moodissa (Schomaker et al., 1995) eli he havaitsevat globaalisti eikä lohkoittain.

Sekä havaitsija että havainto vaikuttavat toisiinsa ja kumpikin saattaa muuttua havaitsemisprosessin aikana huomattavasti. Esimerkiksi, kuulotapahtuma saattaa muuttua kun kuulija keskittyy kuuntelemaan tiettyä äänestä, kuten tiettyä soitinta, orkesterissa. Lisäksi havaitsijan asenne havaintoa kohtaan saattaa muuttua koesarjan kuluessa ja siten vaikuttaa annettuihin vastauksiin.

3.3 Binauraalisen tekniikan tarpeellisuus

On sanomattakin selvää, että tällä järjestelmällä on useita rajoituksia. Esimerkiksi akustisten aaltojen pitää olla kuuloalueella taajuuden ja intensiteetin puolesta, kuulojärjestelmän pitää olla kunnossa ja aivokuoren tietoisessa tilassa, valmiina vastaanottamaan ja tulkitsemaan auditorista informaatiota. Lisäksi signaalien vastaanottamisessa, käsittelyssä ja tulkitsemissa on useita takaisinkytkentöjä. Takaisinkytkentöjä tapahtuu selvästi subkortikaalisen auditorisen systeemin moduulien välillä sekä tämän että aivokuoren välillä. Ilmeinen takaisinkytkentä keskushermoston motoriikan säätelyalueelta on havaittavissa aina kun pään asennon selvitysliikkeitä tehdään (Schomaker et al., 1995).

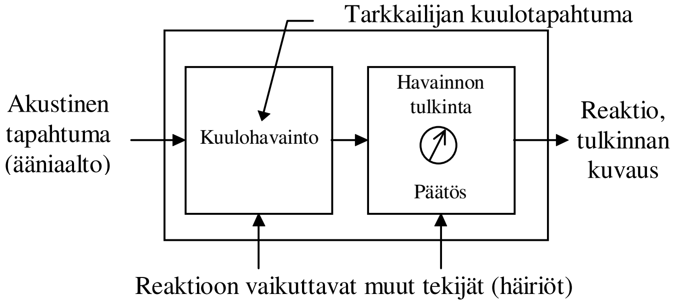
Vaikka ihmiset voivat kuulla yhdelläkin korvalla - ns. *monaural hearing* - kuuleminen kahdella toimivalla korvalla on täysin erilaista. Tätä tosiasiaa voidaan parhaiten tarkastella korvan biologisen roolin kannalta. Nimenomaan korvan biologinen tehtävä on kerätä tietoa ympäristöstä, erityisesti omasta sijainnista tilassa ja äänilähteiden sijainnista sekä niiden aktiviteetin tilasta. Lisäksi tässä yhteydessä tulisi muistuttaa, että yksilöiden välinen kommunikaatio tapahtuu pääasiassa akustisesti, aivojen tulkitessa ajatukset akustisiksi signaaleiksi toisille aivoille.

Tämän kuulon perustehtävän suhteen, binauraalisen etu monauraaliseen kuulemiseen on lueteltavissa mm. seuraavilla osa-alueilla (Blauert, Hearing):

1. Yhden tai useamman äänilähteen paikallistaminen ja vastaavasti “auditorisen perspektiivin” ja auditorisen tilaelämyksen muodostaminen.
2. Eri paikoissa tilassa sijaitsevien äänilähteistä tulevien ei-koherenttien signaalien sekä muutamin rajoituksin koherenttien signaalien erottaminen toisistaan.
3. Suorien (ei-heijastuneiden) signaalien vahvistaminen kaikuisassa ympäristössä kuten myös kohteeksi valitusta lähteestä tulevan äänen vahvistaminen muista ei-koherenteista äänilähteistä.

4. PSYKOAKUSTISET KUUNTELUKOKEET

Psykoakustisia kuuntelukokeita kuvataan seuraavanlaisella (Blauert, 1983) asetelmalla. Herätteenä on äänitapahtuma, tuloksena sisäinen kuulotapahtuma ja tarkkailutavasta riippuen sen ulkoinen kuvaus. Yksinkertainen psykologinen malli auditoriselle havainto- ja arviointiprosessille on kuvassa S.4. Kaaviossa on koehenkilö kuuntelukokeessa.



S.4. Psykologisen kuuntelukokeen kaavio. Havainto, kuten myös sen kognitiivinen käsittely muuntuvat reaktiota muokkaavien tekijöiden vaikutuksesta.

Ääniaallot tulevat kumpaankin korvaan, ne esiprosessoidaan ja ohjataan ylemmälle tasolle keskushermostojärjestelmään, missä ne muodostavat äänitapahtuman koehenkilön havaintomaailmassa. Äänitapahtuma on koehenkilön havainto, eli vain hänellä on suora kosketus siihen. Muulle maailmalle kerrotaan vain siitä, mikäli koehenkilö reagoi siten, että siitä voidaan tehdä johtopäätöksiä (epäsuora kosketus).

Järjestelmällisissä kuuntelukokeissa koehenkilöä pyydetään vastaamaan tietyllä tavalla, esimerkiksi kuvailemalla tietyillä etukäteen valituilla sanoilla kuulotapahtumaa. Mikäli vastaus on kvantitatiivinen tunnusluku voidaan puhua mittauksesta. Kuuntelukokeessa koehenkilö voi toimia siten "mittausinstrumenttina" omille havainnoilleen eli sekä kohteena mittaukselle että “mittarina”. Kaavion S.4. mukaan reaktioon vaikuttavat muut tekijät tuovat häiriötekijöitä eli havaitsemiseen ja sen tulkintaan vaikuttavia persoonallisia vaihteluita kuulohavainto- että tulkintavaiheeseen.

4.1 Binauraalinen mittaustekniikka ja äänenlaadun arviointi

Binauraalinen äänitys-, mittaus- ja analysointitekniikat ovat kehittyneet erittäin voimakkaasti viimeisen vuosikymmenen aikana. Nykyaikaiset binauraaliset äänityspäät varustettuna kehittyneillä tietokonepohjaisilla signaalinprosessointi- ja analysointivälineillä tarjoavat akustiikkasuunnittelijoille hyvät työvälineet sekä subjektiiviseen että objektiiviseen akustisten tilojen suunnitteluun.

Fyysisessä binauraalisessa mittauksessa käytetään fysiikkaan perustuvia menetelmiä, missä auditorisessa mielessä koehenkilö toimii mittaus- ja arviointi-instrumenttina. Nykyisiä sovelluksia binauraalisessa mittauksessa ja arvioinnissa voidaan löytää sellaisilta alueilta kuten meluntorjunnasta, akustisten tilojen suunnittelusta, äänenlaadun arvioinnissa (esimerkiksi puheteknologiassa, arkkitehtuurissa akustiikassa ja tuotteen äänen suunnittelussa) sekä erityisissä mittauksissa puhelinjärjestelmissä, kuulokkeissa, kuulosuojaimissa ja kuulolaitteissa (Blauert et al., 1980), (Schröter, J., 1986). Joissakin sovelluksissa käytetään jopa eri mittasuhteissa rakennettuja keinopäitä, esimerkiksi arkkitehtuuristen pienoismallien arvioinnissa (Els et al., 1985), (Els et al., 1986.), (Xiang et al., 1991.), (Xiang et al., 1993.).

Koska keinopäät ovat perusperiaatteeltaan vain tapa implementoida sarja lineaarisia suodattimia, voidaan ajatella myös muita tapoja toteuttaa sellaisia suodattimia, esimerkiksi sähköisesti. Monissa sovelluksissa tämä antaa paljon lisää vapautta, koska sähköisiä suodattimia voidaan kontrolloida varsin monipuolisesti.

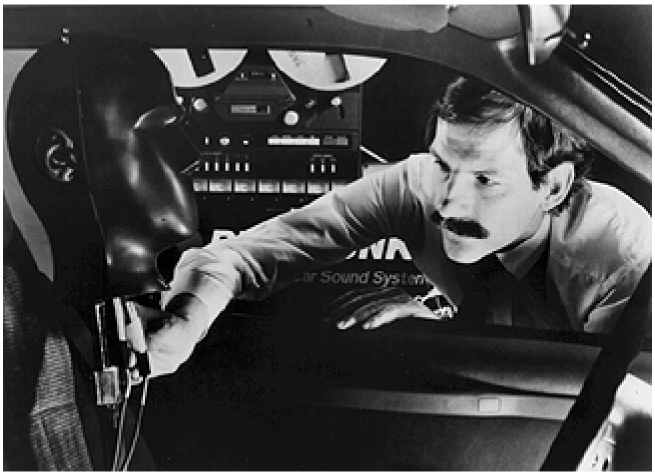
5. BINAURAALINEN ÄÄNITYS- JA TOISTOTEKNIIKKA

Binauraalista äänitystä tehdessä pyritään tallentaman äänikenttä aistillisesti autenttisella tavalla ja toistotekniikalla synnyttämään sama äänikenttä akustisesti erilaisissa tiloissa eri henkilöille. Tällaiselle on käyttöä esim. viihdeteknologian, koulutuksen, tieteellisen tutkimuksen, dokumentoinnin ja valvonnan palveluksessa. Merkittävää on myös, että binauraalisia äänitteitä voidaan verrata suoraan esimerkiksi A/B -kokeilla, mikä on yleensä mahdotonta oikeiden äänilähteiden ollessa kyseessä.

5.1 Laitteisto

Henkilökohtaisten binauraalisten äänitteiden tuottaminen ei vaadi mitään erityislaitteistoa eikä tekniikan syvällisempää tuntemusta. Tarvitaan vain pienet mikrofonit, laadukas tallennin (esimerkiksi DAT-nauhuri) ja kuulokkeet toistotilannetta varten.

Tilanne vaikeutuu huomattavasti, kun kyseisillä äänitteillä pitäisi tuottaa autenttinen toisto useammille henkilöille. Äänitys tulee tehdä tarkkaan valitulla päällä (hyvä "lokalisointipää"), yleensä keinopäällä (kuva S.5.) ja jokaiselle kuuntelijalle joudutaan laskemaan ja toteuttamaan korjaussuotimet. Tänä päivänä itse signaalin *ekvalisointi* (kappale 5.4) onnistuu toistotilanteessa reaaliaikaisesti useammallekin henkilölle yhtäaikaa, tehokkaiden signaaliprosessorien ansiosta.



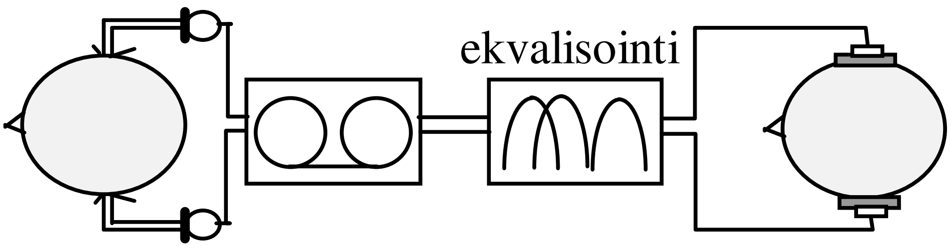
S.5. Yksi suurimmista binauraalisen tutkimuksen rahoittajista on autoteollisuus. Äänen häiritsevyys ja laatu on nousemassa tärkeimmäksi tutkimuksenkohteeksi.

Keinopää tulee valita käyttötarkoituksen mukaan. Mikäli tutkimus tapahtuu pääasiassa laboratoriossa, ei signaalin prosessointia tarvita implementoituna. Kenttäolosuhteiden evaluointia varten on keinopäitä, joissa on laadukas tallennin ja tarvittavat ekvalisoinnit sisäänrakennettuna. Mikäli suuntakuulon arviointi on kriittistä kuuntelukokeissa, tulee ottaa huomioon olkapäiden ja ylävartalon osuus. Etu- ja takaerottelukyvyn osalta vaikutus on ± 3dB ylävartalon osalta ja ± 5 dB olkapäiden osalta (Genuit, 1984).

5.1.1 Tosipää

Paraskaan keinopää ei ole niin hyvä binauraalisen äänitteen valmistukseen kuin kuuntelijan oma pää. Yksi vaihtoehto on järjestää kuuntelukoe hyvän "äänityspään" löytämiseksi (Møller et al. ,1996). Parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi toistotilanteessa tulee joka tapauksessa tehdä yksilölliset ekvalisoinnit jokaiselle kuuntelijalle, joten useimmissa tapauksissa tosipää soveltuu erittäin hyvin äänityksiin. Kuvassa S.7. on pieni mikrofoni korvakäytävään laitettuun korvatulppaan upotettuna.

Tosipää-äänityksessä on monia etuja keinopää-äänityksiin. Turhia signaalijohtoja jää pois, kun tarvitaan vain kuulokkeista tallentimelle menevät johdot. Tämän hetken parhaita mikrofoneja tosipää-äänityksissäkin ovat kondensaattorimikrofonikapselit (kuvassa S.11.). Ne vaativat polarisaatiojännitteen (phantom), jonka järjestäminen voi joskus tuottaa ongelmia. Äänitys voidaan tehdä helposti liikkuvassa kohteessa. Ainoastaan liikkumisen laatu voi tuottaa ongelmia - tärinänkestävät tallennuslaitteet ovat varsin kalliita. Tosipäällä tehdään äänityksiä eri kohdilta korvakäytävältä. *Sondimikrofonit* mahdollistavat äänityksen teon jopa tärykalvon välittömästä läheisyydestä.



S.6. Binauraalinen äänitys sondimikrofonin avulla tosipäästä. Sama henkilö kuuntelee äänityksen.

Ekvalisointi (kappale 5.4) on välttämätöntä myös tosipää-äänitteiden toistossa.

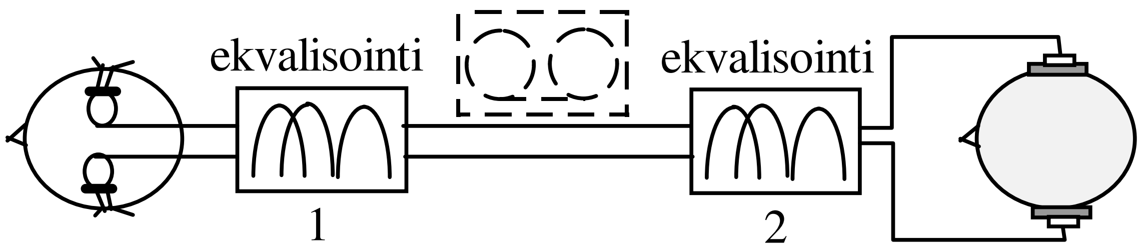
5.1.1.1 Sondimikrofonit

Kaavio kaikkein yksinkertaisimmasta laitteistosta binauraaliseen äänitykseen ja toistamiseen on kuvassa S.6. Kumpaankin koehenkilön korvaan tulevat äänipaineaallot tallennetaan sondimikrofoneilla (kutsutaan myös *probemikrofoneiksi*) ja myöhemmin toistetaan samalle henkilölle tarkoituksenmukaisen ekvalisoinnin jälkeen. Sondimikrofoni on ohut (1-2 mm ulkohalkaisijaltaan) putki ja sen päässä oleva pieni mikrofonikapseli. Putki työnnetään tärykalvon lähelle.

S.7. Mikrofoni pysyy hyvin paikallaan korvan taakse menevän sangan ansiosta.

5.1.2 Keinopäät

Keinopäillä (kaavio kuvassa S.8.) on monia käytännön etuja tosipäihin verrattuna useimmissa sovelluksissa. Esimerkiksi ne mahdollistavat reaaliaikaisen äänitarkkailun fyysisesti eri paikassa. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että keinopäät on muotoiltu ja suunniteltu tyypillisen keskivertoihmisen mukaan. Niiden suuntaavuusominaisuudet eroavat yleensä yksittäisen kuuntelijan ominaisuuksista. Tämä tosiseikka voi huonontaa merkittävästi kuuloelämyksen autenttisuutta. Esimerkiksi virheitä, kuten äänen värittymistä ja etu-takaerottelun sekoittumista esiintyy. Henkilökohtaiset säädöt ovat vain osittain mahdollisia, nimittäin ekvalisoimalla kuulokkeet jokaiselle kuuntelijalle erikseen. Tämän vuoksi ekvalisaattori joudutaan jakamaan kahteen komponenttiin, pääekvalisaattoriin (1) ja kuuloke-ekvalisaattoriin (2). Liityntä näiden kahden välillä mahdollistaa hieman valinnan vapautta. On selvää, että henkilökohtaiset säädöt koko järjestelmässä (lukuunottamatta yksittäistä äänentulosuuntaa) ovat mahdottomia, ellei sitten keinopään ja kuuntelijan pään siirtofunktiot ole identtisiä.



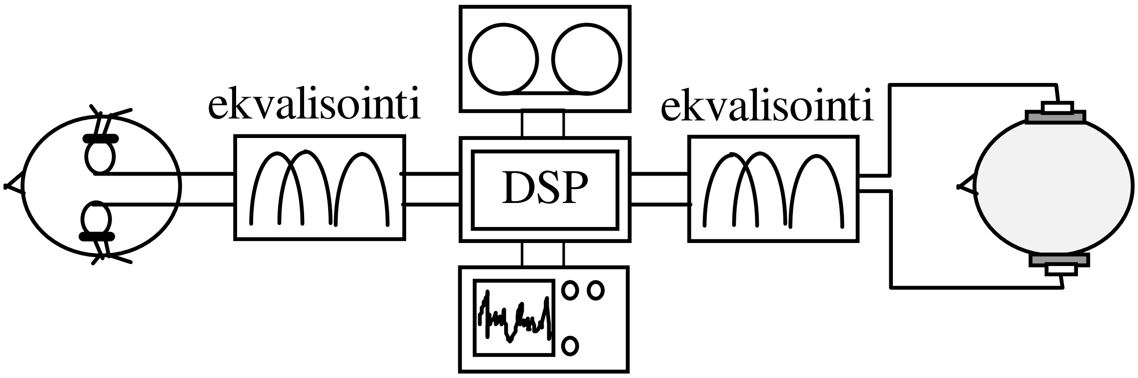
S.8. Binauraalinen äänitys keinopäällä. Pää- (1) ja kuulokekorjain (2).

5.1.3 Talletuslaitteisto

Käytetyin tallennusformaatti on nauha. DAT-nauhurin ominaisuudet riittävät lähes kaikkien kuuntelukokeissa käytettävien näytteiden tallentamiseen. Yksi, laboratorio-olosuhteissa erinomainen keino on kovalevytallennus. Nykyisin on saatavilla hyvinkin laadukkaita 20-bittisiä koodekkeja eri tietokoneille. Kenttäkäytössä ainoaksi vaihtoehdoksi jää DAT, ja senkin tärinän- ja pölynsietokyvyt joutuvat kovalle koetukselle.

5.1.4 Signaalinkäsittely

Kuvassa S.9. kuvataan asetelmaa sovellukselle, jossa signaaleja kumpaankin kuulijan korviin tullaan mittaamaan ja käsittelemään tietokoneella. Signaalinkäsittelylaitteilla on tarkoitus työstää äänitettyjä signaaleja. Vaikka tosiaikainen signaalinkäsittely ei ole tarpeellista useimmissa sovelluksissa, tosiaikainen toisto on välttämätöntä. Muunneltuja ja muuntelemattomia signaaleja voidaan tarkkailla joko signaalianalysaattorilla tai binauraalisella kuuntelulla.



S.9. Keinopää-järjestelmä signaalin käsittely- ja analysointimahdollisuuksilla.

5.1.5 Muut keinot binauraalisten äänitteiden tuottamiseksi

Kuuntelukokeissa käytetään myös keinotekoisesti tehtyjä binauraalisia ääninäytteitä. Ne vaativat paljon monimutkaisemman laitteiston. Signaaleja ei enää tallenneta koehenkilön korvista tai keinopäästä, vaan ne on äänitetty tai jopa generoitu ilman korvan tai keinokorvan vaikutusta. Esimerkiksi kaiuttomia äänitteitä tavanomaisilla studiomikrofoneilla käytetään. Ihmiskorvan synnyttämät lineaariset säröt voidaan saada aikaan sähköisesti HRTF:illä (sähköinen keinopää). Riittävän pään siirtofunktion määrittämiseksi jokaiselle signaalikomponentille, järjestelmä tarvitsee tietoa äänikentän geometriasta. Tyypillisessä sovelluksessa, kuten huoneakustiikkasuunnittelussa, järjestelmä sisältää huoneen geometriaan perustuvan äänikenttäsimuloinnin, materiaalien absorptio-ominaisuudet sekä äänilähteiden paikat ja suuntaavuusominaisuudet. Äänikentän mallintamisen jälkeen "sähköinen keinopää" kykenee tuottamaan binauraalisia impulssivasteita. Näiden impulssivasteiden konvoluutio kaiuttomien äänisignaalien kanssa saa aikaan binauraalisia signaaleja, joita henkilö voisi kuulla vastaavassa oikeassa huoneessa. Menetelmää kutsutaan usein *binauraaliseksi huonesimuloinniksi*.

Antaakseen koehenkilölle vaikutelman että hän on kuulemassaan äänikentässä on tärkeää, että tilantuntu säilytetään. Toisin sanoen, kun henkilö liikuttaa päätään, havaitun auditorisen maailman tulisi siitä huolimatta säilyttää tilailluusio. Simulointisysteemin tulee siten tietää pään asento kyetäkseen muuttamaan impulssivasteita riittävästi. Pään asennon ilmaisimet on tästä syystä lisättävä järjestelmään. Vaikutelma tilassa olemisesta on erittäin tärkeä virtuaalitodellisuussovelluksien osa-alue.

5.1.6 Kuulokevahvistimet ja kuulokkeet

Toistotilanteessa tarvitaan yleensä erityinen kuulokevahvistin, jotta saadaan koko dynamiikka kuulokkeisiin. Kuulokeliitännät tavallisissa vahvistimissa tai toistolaitteissa, jopa high end-malleissa, ovat järjestään alimitoitettuja, sillä se ominaisuus ei ole juuri koskaan ensisijainen funktio. Jotkut kuulokevahvistimet käyttävät luokan A -kytkettyä pääteastetta, joka antaa parhaan tuloksen - tosin huonolla hyötysuhteella (suuri virrankulutus). Useita malleja on saatavilla eri valmistajilta kuten HeadRoom, McCormack, Melos, Krell, AKG, EarMax ja Behringer.

Kuulokkeiden merkitystä ei pidä väheksyä. Kuuloke-ekvalisoinnit tulee tehdä jokaiselle kuuloketyypille erikseen. Kuulokkeet eivät saa myöskään häiritä korvasta ulospäin nähtävää akustista impedanssia. *Suljetut* kuulokkeet toteuttavat harvoin tämän ehdon. Eri kuulokkeiden soveltuvuudesta binauraaliseen kuunteluun kriteerillä *avoimuus* on tehty myös tutkimus (Møller et al., 1992).

5.2 Äänitys tosipäällä

Äänitykset ihmispäällä voidaan jakaa kolmeen erilailla käsiteltävään tapaukseen: tärykalvolta (kappale 5.4.2), korvakäytävän suulta (kappale 5.4.3) ja korvakäytävän suulta, korvakäytävä suljettuna (kappale 5.4.4). Korvakäytävä suljettuna korvakäytävän suulta tallennettuihin signaaleihin sisältyy kaikkein vähiten subjektiivista säröä (Møller, 1992).

S.10. Mikrofoni jää korvakäytävän aukon tasalle. Korvakäytävä suljetaan tulpalla.

Alhainen herkkyys ja siten huono signaalikohinasuhde on usein ongelma pienissä mikrofoneissa. Lisäksi niiden dynamiikka ei ole riittävä kaikkiin äänityksiin. Kuuntelukokeissa käytettävä dynamiikka-alue onkin määritettävä aina etukäteen ja näin valmisteltava äänitys sitä silmällä pitäen. Toisaalta tallenninlaitteillakaan ei kyetä toistamaan ihmiskorvan hallitsemia valtavia dynamiikkaeroja. Lisäksi pienien mikrofonien kalibrointi voi tulla ongelmaksi.

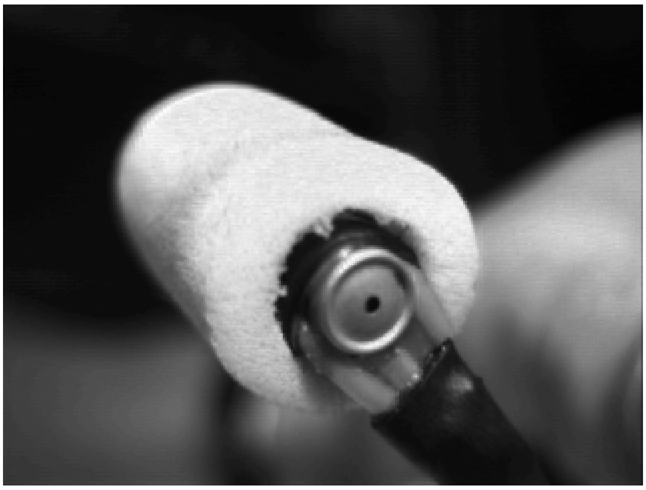
Myös äänityksen tarkkailun vaikeus on ongelma tosipää-äänityksissä. Yksi vaihtoehto olisi käyttää pientä radiolähetintä äänittävän henkilön mukana ja varsinainen signaali tallennettaisiin tarkkaamossa, jossa olisi vastaanotin.

5.2.1 Mikrofonien sijoitus

Kappaleessa 3.1.1 todettiin, ettei mikrofonin sijoitus äänittäessä ole kriittinen tekijä.

5.2.2 Mikrofonit erilaisille päille

Yksilöiden välillä on suuriakin eroja. Korvat ovat erimallisia ja erikokoisia. Mikäli äänityksiä toistetaan samoilla henkilöillä usein, paras tapa olisi valaa kullekin yksilölliset korvatulpat, joihin mikrofonit upotettaisiin (kappale 3.1.1). Näin mikrofonin sijoitus olisi aina tarkka ja ne pysyisivät paremmin päässä. Kuvassa S.11. on yksi edullinen vaihtoehto.



S.11. Tosipää-äänityksissä käytetty Sennheiserin painemikrofonikapseli (KE-4-211-2) E-A-R korvatulpassa.

5.3 Äänitys keinopäällä

Keinopäällä äänittämistä koskevat samat fysiikan lait kuin tosipäätä. Äänityksessä tulee ottaa samat asiat huomioon. Keinopäihin on usein integroitu suodinten lisäksi muitakin käyttökelpoisia ominaisuuksia: nauhalle voi tallentaa esim. äänitettävän koneen kierrosluvut takometrin avulla. Tästä on hyötyä signaalianalyysia tehdessä. Jokaisella valmistajalla on oma käyttöliittymänsä ja keinopään mukana tulee yksityiskohtaiset käyttöohjeet.

5.4 Ekvalisoinnit

Vaikka ihmiset ovat hyvin hämmästyneitä binauraalisten äänitysten autenttisuudesta, lokalisointi heikkenee huomattavasti ja etäisyyden arvioinnissa tulee virheitä, mikäli kuunnellaan toisen henkilön päällä äänitettyjä binauraalisia äänitteitä (Møller et al., 1995/3), (Hudde, 1980). Kuulokkeiden kunnollisesta ekvalisoinnista ei yleensä välitetä. Ekvalisointi on tarpeen korjaamaan mikrofoneissa, tallennuskalustossa sekä kuulokkeissa syntyneet lineaariset säröt. Äänityspään suunnitteluun käytetään paljon aikaa ja rahaa, mutta kuunteluun käytetään mitä tahansa kuulokkeita.

Hyvä lokalisointi voidaan saavuttaa vain *horisontaalitasossa,* mikäli ei käytetä henkilökohtaisia HRTF:iä (Wightman et al, 1992).

Keinopäiden ekvalisointiprosessoreille on usein saatavana muitakin kuin puhtaita vapaakenttä- ja diffuusikenttäkorjaimia. Usein nämä ovat edellisten variaatioita joillakin erityispiirteillä. Neumann:n ja Head Acoustics:n keinopäihin löytyy myös korjain suoraan stereokaiutinkuunteluun.

5.4.1 Kuuloke-ekvalisoinnit

Kuuloke-ekvalisoinnit voidaan helposti mitata suoraan. Siirtofunktio on

$$G = \frac{E_{kuuloke}}{p_{korva}}, \tag{1}$$

missä $E_{kuuloke}$ on jännite kuulokeliitännässä ja p_{korva} on jännitettä vastaava äänipaine samassa siinä pisteessä korvakäytävällä, minne ekvalisointi halutaan tehdä.

5.4.2 Tärykalvolta äänittäminen

Eniten käytetty tapa tähän saakka binauraalisessa tekniikassa on ollut äänitys tärykalvon pinnan läheisyydestä sondimikrofonilla ja toisto kuulokkeilla. Jos mikrofonin siirtofunktio on M_1 (määrittelee myös herkkyyden sekä taajuusvasteen) ja siirtofunktio mikrofonista kuulokkeisiin on G_A, niin kokonaissiirtofunktio äänikentästä p_1 (äänipaine pään keskellä, mikäli pää ei olisi äänikentässä) äänipaineeseen tärykalvolla p_7 on

$$\left[\frac{P_4}{P_1}\right] \cdot M_1 \cdot G_A \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right], \tag{2}$$

missä $E_{kuuloke}$ on jännite kuulokeliitännässä, p_4 äänipaine tärykalvolla ilman kuulokkeita ja vastaavat isot (capital) kirjaimet ilmoittavat kyseisen suureen taajuustasossa. Tavoite siis olisi

$$\left[\frac{P_4}{P_1}\right]. \tag{3}$$

Jos yhtälöt (2) ja (3) merkitään yhtäsuuriksi, saadaan

$$G_A = \frac{\left[\frac{P_4}{P_1}\right]}{\left[\frac{P_4}{P_1}\right] \cdot M_1 \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right]} = \frac{1}{M_1 \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right]}. \tag{4}$$

Johtopäätös. Oikea ekvalisointi saadaan, kun mikrofonin herkkyys ja kuulokkeen siirtofunktio (kappale 5.4.1) tärykalvolle saadaan kompensoitua.

5.4.3 Korvakäytävän suulta äänittäminen

Kuten kappaleessa 3.1.1 todettiin, avoimen korvakäytävän suulta tehty äänite sisältää koko spatiaalisen informaation. Kuten edellä, mikrofonin siirtofunktio on M_1 ja siirtofunktio mikrofonista kuulokkeisiin on G_B. Kokonaissiirtofunktio äänikentästä p_1 äänipaineeseen tärykalvolla p_7 on

$$\left[\frac{P_3}{P_1}\right] \cdot M_1 \cdot G_B \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right], \tag{5}$$

missä $E_{kuuloke}$ on jännite kuulokeliitännässä ja p_3 äänipaine korvakäytävän suulla ilman kuulokkeita. Tämän tulisi olla

$$\left[\frac{P_4}{P_1}\right]. \tag{6}$$

(5) ja (6) merkitään yhtäsuuriksi ja lavennetaan P_6/P_6:lla, missä P_6 on paine korvakäytävän suulla kuulokkeen kanssa, saadaan

$$G_B = \frac{\left[\frac{P_4}{P_1}\right]}{\left[\frac{P_3}{P_1}\right]\cdot M_1 \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right]} = \frac{\left[\frac{P_4}{P_3}\right]}{\left[\frac{P_7}{P_6}\right]} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \left[\frac{P_6}{E_{kuuloke}}\right]}. \tag{7}$$

Ensimmäinen termi on yksi, sillä äänen siirtofunktio korvakäytävän suulta tärykalvolle on riippumaton äänilähteestä (Møller, 1992), (katso myös kappale 5.1.6). Siten

$$G_B = \frac{1}{M_1 \cdot \left[\frac{P_6}{E_{kuuloke}}\right]}. \tag{8}$$

Johtopäätös. Oikea ekvalisointi saadaan, kun mikrofonin herkkyys ja kuulokkeen siirtofunktio (kappale 5.4.1) korvakäytävän suulle saadaan kompensoitua.

5.4.4 Korvakäytävän suulta, korvakäytävä suljettuna äänittäminen

Kappaleessa 3.1.1 todettiin, että myös suljetun korvakäytävän suulta voidaan tehdä täydellinen binauraalinen äänitys. Mikrofonin siirtofunktio on M_1 ja siirtofunktio mikrofonista kuulokkeisiin on tässä G_C. Kokonaissiirtofunktio on

$$\left[\frac{P_2}{P_1}\right]\cdot M_1 \cdot G_C \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right], \tag{9}$$

missä p_2 on äänipaine suljetun korvakäytävän suulla ilman kuulokkeita. Tämän tulisi olla

$$\left[\frac{P_4}{P_1}\right]. \tag{10}$$

Tämä toteutuu, jos (9) ja (10) ovat yhtäsuuria. Lavennetaan ja saadaan

$$G_C = \frac{\left[\frac{P_4}{P_1}\right]}{\left[\frac{P_2}{P_1}\right]\cdot M_1 \cdot \left[\frac{P_7}{E_{kuuloke}}\right]} = \frac{\left[\frac{P_4}{P_3}\right]}{\left[\frac{P_7}{P_6}\right]} \cdot \frac{\left[\frac{P_3}{P_2}\right]}{\left[\frac{P_6}{P_5}\right]} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \left[\frac{P_5}{E_{kuuloke}}\right]}. \tag{11}$$

Ensimmäinen termi on yksi kuten edellä. Jos merkitään ilman kuulokkeita olevan korvan

$$\frac{\text{Äänenpaine\_avoimen\_korvakäytävän\_suulla}}{\text{Äänenpaine\_suljetun\_korvakäytävän\_suulla}} = \frac{P_3}{P_2}, \tag{12}$$

ja Thevenin teoreeman mukaan

$$\frac{Z_{korvakäytävä}}{Z_{korvakäytävä} + Z_{säteily}} = \frac{P_3}{P_2}, \tag{13}$$

missä $Z_{säteily}$ on samassa tilanteessa korvakäytävästä ulos näkyvä impedanssi. Samoin voidaan laskea kuulokkeille:

$$\frac{Z_{korvakäytävä}}{Z_{korvakäytävä} + Z_{kuuloke}} = \frac{P_6}{P_5}, \tag{14}$$

missä $Z_{kuuloke}$ on korvakäytävästä ulos näkyvä impedanssi, kun kuuloke peittää korvan. P_5 on äänipaine suljetun korvakäytävän suulla kuulokkeiden kanssa. Kun lauseet (13) ja (14) sijoitetaan siirtofunktioon (11) ja supistetaan, saadaan

$$G_C = \frac{Z_{korvakäytävä} + Z_{kuuloke}}{Z_{korvakäytävä} + Z_{säteily}} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \left[\dfrac{P_5}{E_{kuuloke}}\right]}. \tag{15}$$

Ideaalisille avoimille kuulokkeille ensimmäinen termi on yksi (Møller, 1992), joten

$$G_C = G_C^{\ *} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \left[\dfrac{P_5}{E_{kuuloke}}\right]}, \tag{16}$$

missä $G_C^{\ *}$ on mahdollinen kuulokekompensaatiokerroin, ideaalitapauksessa $G_C^{\ *}=1$.

Johtopäätös. Oikea ekvalisointi saadaan, kun mikrofonin herkkyys, kuulokkeen siirtofunktio (kappale 5.4.1) suljetun korvakäytävän suulle sekä kuulokkeen aiheuttaman akustisen impedanssin suhde ilmaan saadaan kompensoitua. Ideaalisen avoimen kuulokkeen tapauksessa kuulokkeet akustisen impedanssin suhde ilmaan on yksi.

5.4.5 Vapaakenttäkorjaus

Koska äänittävällä päällä on erilaiset siirtofunktiot äänen eri tulokulmille, tasaista taajuusvastetta ei voida saavutta kaikista kulmista. Jos suurin osa äänitapahtumista on suoraan pään edessä, voidaan korjainsuodin suunnitella siten, että saadaan tasainen taajuusvaste suoraan edestä tulevalle herätteelle. Tätä kutsutaan vapaakenttäekvalisoinniksi (eng. free-field equalization).

Äänityskohdalla korvakäytävästä ei ole merkitystä kun äänitys on vapaakenttäekvalisoitu. Kun siirtofunktio korjataan antamaan tasainen vaste tietylle suunnalle jossakin äänityskohdassa, on vaste sama muissakin kohdissa äänitetyille signaaleille (Møller, 1992).

5.4.6 Diffuusikenttäkorjaus

Diffuusin kentän korjainsuodin suunnitellaan siten, että saadaan tasainen taajuusvaste diffuusissa äänikentässä. Ohjaamoissa ja muissa pienissä tiloissa, joissa on paljon lasia ympärillä (etenkin työkoneissa), tulisi käyttää diffuusinkentän korjainta. Sama tilanne on jos äänittävä pää on kauempana äänilähteestä kuin äänitystilan säde.

Myöskään diffuusille kentälle korjattu vaste ei muutu, kun äänityskohta korvakäytävällä muuttuu (katso 5.4.5).

5.5 Toistotekniikka

Kaiuttimia voidaan myös käyttää binauraalisen äänityksen toistossa (Griesinger, 1989). Kaiuttimien synnyttämä äänikenttä on parhaiten hallittavissa kaiuttomassa huoneessa (hiljainen, heijastukseton tila) tai tarkoituksenmukaisessa kuunteluhuoneessa. Täydelliseen tilantunnun toistoon ei kaiuttimilla ole vielä päästy, mutta oikean ekvalisoinnin avulla laatu on verrattavissa tavanomaiseen stereoäänitykseen äänen sävyn ja tilantunnun osalta (Theile, 1981). Kuulokkeet ovat helpoin vaihtoehto, koska ympäristön akustiikan vaikutus vähenee tai poistuu kokonaan. Lisäksi ekvalisoinnissa ei tarvitse ottaa huomioon eri kanavien signaalien sekoittumista ilman kautta kuten kaiutinkuuntelussa.

Äänten paikantumisesta käytetään nimitystä *lokalisaatio* puhuttaessa kuuntelusta kaiuttimilla ja *lateralisaatio* puhuttaessa kuuntelusta kuulokkeilla (Jauhiainen, 1995).

5.5.1 Toisto stereokuulokkeilla

Kuuloketoisto takaa sekä sen, että kummankin kanavan signaali päätyy ainoastaan yhteen korvaan ja ettei kuunteluhuoneen heijastukset häiritse.

5.5.2 Tasojen kalibrointi

Jotta toisto olisi mahdollisimman autenttinen, on suoritettava tasojen säätö vastaamaan äänitystilannetta. Äänitteelle pitää tallentaa kalibrointisignaali myöhempää toistotilanteen verifiointia varten. Kuuntelukokeiden luonteesta riippuen kalibrointi on usein ääninäytteiden normalisoinnin apukeino. Pienillä tosipää-mikrofoneilla ja sondimikrofoneilla kalibrointi voi olla ongelmallista. Keinopäissä käytetään usein ½- tai ¼ -tuuman mittausmikrofoneja, jotka on helppo kalibroida luotettavasti. Kuvassa S.12. erityisesti kyseistä mikrofonimallia ja sen korvasankaa varten valmistettu sovitin tavanomaiseen kalibraattoriin.

S.12. Erään tosipää-mikrofonin kalibrointiin käytetty laitteisto.

Mikäli äänitemateriaali on voimakasta melua, ei ole järkevää toistaa sitä alkuperäisellä voimakkuudella. Tällöin määritetäänkin usein *melun laatua*, joka ei edellytä absoluuttisia äänipaineita.

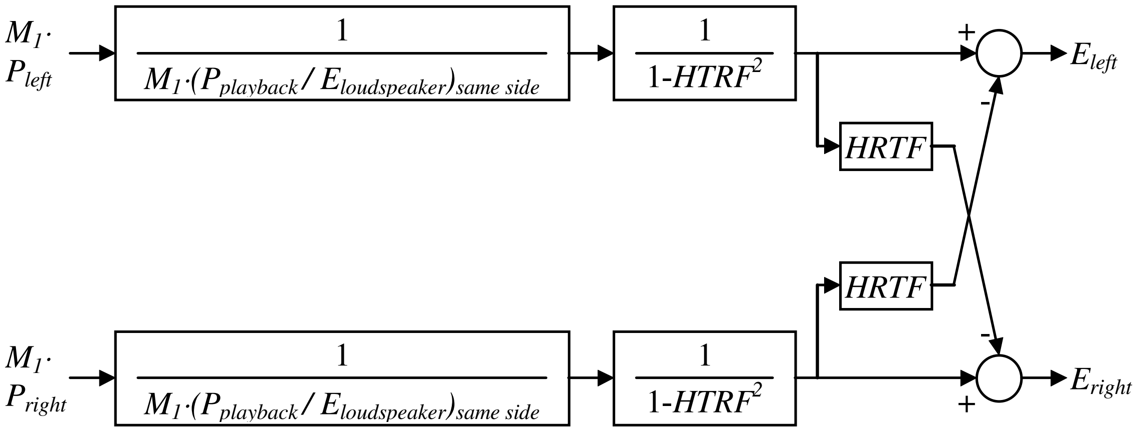
5.5.3 Toisto stereokaiuttimilla

Kaiutinkuuntelun ongelma on kanavien ylikuuluminen (crosstalk) sekä kuunteluhuoneessa esiintyvät heijastukset. Täydelliseen toistoon ei ole vielä päästy, mutta teoriassa se on mahdollista (Bauer, 1961)(Damaske, 1971)(Cooper, 1989)(Møller, 1989).

Møllerin (1989) menetelmän mukaan kanavien ylikuuluminen voidaan poistaa prosessoimalla kanavien signaalit algoritmin (17) mukaan (katso kuva S.13.).

$$E_{loudspeaker} = \frac{P_{record,same\_side} - P_{record,opposite\_side} \cdot HRTF}{\left[\frac{P_{playback}}{E_{loudspeaker}}\right]_{same\_side} \left(1 - HRTF^2\right)}, \tag{17}$$

Vasemmanpuoleiset lohko tekevät kaiuttimien ja mikrofonien ekvalisoinnin. Seuraavat lohkot suorittavat poistavat ylikuulumisesta aiheutuvan värittymisen (myös ekvalisointi). Taajuuksilla, joilla ylikuuluminen on vähäistä, tämän lohkon kerroin on noin yksi. Todellinen ylikuulumisen eliminointi tehdään kahdella ristiinkytketyllä lohkolla.



S.13. Kaavio yhtälöstä signaalinkäsittelyn keinoin. Kuvassa E_{left} ja E_{right} ovat kaiuttimille menevät signaalit ja P_{left} sekä P_{right} äänitetyt äänipaineet korvista.

5.6 Äänitys kuuntelukokeita varten

Kuuntelukokeissa käytetään yleensä hyvin yksinkertaisia ääninäytteitä, koska muuten faktoreiden määrä lisääntyy suhteessa näytteen äänikomponentteihin erittäin hankalasti analysoitavaksi. Binauraalisia äänityksiä hyödyntävissä kuuntelukokeissa käytettävät ääninäytteet vaihtelevat alle sekunnista muutamaan sekuntiin, jos on kyse eri näytteiden vertailusta. Tämän vuoksi on pyrittävä tallentamaan aina tiettyä tilannetta riittävän pitkä aika, jolloin mitään muutosta ei tapahdu äänikentässä (liike, kiihdytys). Äänitystilanteessa on tärkeää, että saadaan talletettua mahdollisimman hyvälaatuista materiaalia signaalikohinasuhteeltaan ja kaikki häiriötekijät, joita kuuntelukokeessa ei arvioida tulee eliminoida. Riippuu hyvin paljon kuuntelukokeen luonteesta ja sisällöstä, mitä asioita äänitystilanteessa tulee pyrkiä saamaan esiin ja talletettua. Jos kyseessä on tuotteen äänenlaadun arviointi, on tärkeää että juuri ne mahdollisesti asiakasta häiritsevät kolahdukset ja vihellykset tulevat nauhalle.

5.7 Käytännön ongelmia

Kun korvakäytävä on suljettu, äänittävä henkilö ei kuule kovin hyvin ja tämä voi aiheuttaa vaaratilanteita.

Etu- ja takalokalisointi on usein vaikeaa binauraalisilla äänitteillä. Yksi selitys sille on se, että ihminen tekee koko ajan pieniä pään liikkeitä tarkentaakseen äänen paikallistamista. Binauraaliset äänitteet eivät reagoi pään kääntämiseen. Tosipäällä tehtävissä äänitteissä on usein ongelmana äänittävän pään liikkeet. Ne saavat kuuntelijan äänen paikantamistoiminnon sekaisin, sillä hän ei kykene kääntämään samanaikaisesti samaan suuntaan päätään ilman erikoistoimenpiteitä.

5.7.1 Pään liikkeiden seuranta

Yksi keino saada binauraaliset äänitteet "elämään" olisi syöttää kuuntelijan pään liikkeet signaaliprosessorille ja laskea sillä kääntymisestä aiheutuneet muuttuneet HRTF:t, joilla signaalia sitten muokattaisiin. Toinen keino voisi olla äänityksen videointi.

5.7.2 Videointi

Varustamalla äänittävä pää pienellä videokameralla, voitaisiin sen liikkeet ("katse") taltioitua synkronisesti äänitteen kanssa. Tämä helpottaisi äänitteen kuuntelua, kun pään asennosta olisi jonkinlaista tietoa.

6. SOVELLUKSIA

6.1 Binauraalinen simulointi ja visualisointi (engl. simulation and displays)

On olemassa monia sovelluksia binauraalisessa simuloinnissa ja visualisoinnissa jo nyt ja ala on voimakkaassa kasvussa. Esimerkiksi binauraalinen miksaus (Pösselt et al., 1986.), binauraalinen huoneiden simulointi (Lehnert, et al., 1989.) sekä (Lehnert, et al., 1992.), kehittyneimmät ääniefektit (esimerkiksi tietokonepeleissä), kuulon avulla suunnistamisessa varoitusääninä (esimerkiksi ohjaushyteissä tai sokkolentämisessä), monimutkaisen tiedon auditorisissa visualisoinneissa sekä esityksissä, telekonferensseissa ja teleoperaattori-järjestelmissä.

6.2 Melun ja puheen laadun arviointi

Testihenkilöiden arvio riippuu heidän kokemukseen perustuvasta illuusiosta kohteesta. Esimerkiksi ääntä kuorma-autosta pidetään kovempana kuin henkilöautoista vaikka ne antaisivat täsmälleen saman fysikaalisen äänen. Melun arviointiin A-painotetut äänipainetasot ovat yleensä riittämättömiä. “Kuva” äänestä muodostuu kuulijan mielessä mm. vihjeisiin muilta aisteilta (esim. näkö) ja aikaisempaan kokemukseen.

Mikäli haluamme rakentaa mutkikkaita laitteita jotka perustuvat tähän tekniikkaan, ei ole epäilystäkään että psykologiset ominaisuudet tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi, binauraalinen valvontajärjestelmä tehtaaseen. Sellaisen järjestelmän tulee erottaa melusta tärkeät signaalit ja valikoida niistä ne, jolloin tapahtuu jotain poikkeavaa.

6.3 PA-järjestelmät

Teattereissa ja konserteissa miksauspöytä vie monta arvokasta katsojapaikkaa. Lisäksi se häiritsee usein tilaisuutta muutenkin läsnäololla. Sijoittamalla keinopää konserttisaliin, voidaan miksaus tehdä missä tahansa muulla. Teoriassa vaikka toisella puolella maapalloa verkkoyhteyksien kautta.

6.4 Etäkokoukset

Binauraalisen äänitys- ja toistotekniikan yksi sovellus voisi olla esim etäneuvottelut, joissa kuulija kykenisi lokalisoimaan kiinnostavan puhujan ja siten muut samaan aikaan puhuvat eivät häiritsisi ymmärtämistä, kuten todellisessakin elämässä (“coctail-party efekti”).

6.5 Heikkokuuloisten apu

Yleensä kuulolaitteet vahvistavat vain toisen korvan kuuloa. Binauraalisesta tekniikasta on ollut paljon apua osittain heikkokuuloisten puheenymmärtämisessä. Binauraaliset kuulolaitteet ottavat äänen vastaan korvakäytävän suulta ja syöttävät sen joko akustisesti tai mekaanisesti tärykalvolle. Kappaleessa 2.5 on esitelty hienostuneempi kuulolaite.

6.6 Muut sovellukset

Teknillisen korkeakoulun akustiikan laboratoriossa harjoitustyönä tehty (Maijala et al., 1996) suuntakuuntelija “Keino Suuntonen” (kuvassa S.14.).

S.14. Mr Keino Suuntonen soveltaa binauraalista tekniikka tiedekeskus Heurekassa.

Keinon korvissa on mikrofonikapselit ja se laskee niihin tulevien signaalien välille ristikorrelaation. Tämän jälkeen se kääntää päänsä tulevaa ääniaaltoa kohti. Kyseistä tekniikkaa soveltaen on helppo keksiä monia eri käyttötarkoituksia. Yksi voisi olla videokameran ohjaus. Kamera voisi olla valvontatarkoituksessa tai kuvaamassa tärkeissä kokouksissa kulloistakin puhujaa.

6.7 Binauraalisia tuotteita ja alan yrityksiä

SDRC (Structural Dynamics Research Corp.) ja Bruel & Kjaer ovat tehneet yhteistyössä binauraalisen äänenlaatujärjestelmän. Se koostuu Silicon Graphics -työasemasta ja mittauslaitteistosta sekä I-Deas Sound Quality Engineering -ohjelmasta. Kyseinen ohjelma mahdollistaa suunnittelijoiden mitata ja läpikotaisin analysoida tuotteidensa ääntä. Lisäksi ohjelma analysoi tuotteen äänestä useita psykoakustisia tunnuslukuja. Mikäli jotain ei-toivottua löytyy, voi suunnittelija ohjelman avulla “virittää” tuotteen ääntä hyväksyttävämmäksi.

Seuraavilla yrityksillä on binauraaliseen tekniikkaan liittyviä tuotteita:

Ambisonic Surround Sound	http://www.omg.unb.ca/~mleese/ambison.html
Brüel & Kjær	Nœrum, Denmark
CATT	http://www.netg.se/~catt
Chromatic Research	http://www.chromatic.com
Core Sound Binaural Microphones	http://www.panix.com/~moskowit/mics.html
Creative Labs	http://www.creaf.com
Crystal River Engineering	http://www.cre.com:80/cre
Etymotic Research	

Focal Point	http://www.fpointinc.com/data/ads/focprod.htm
HEAD Acoustics	Aachen, Germany
HeadRoom	http://headroom.headphone.com
Holophonics	http://www.holophonics.com
Knowles Electronics	http://www.aeanet.org/homepage/mem2int/3a82.html
Lake DSP Pty. Ltd	http://www.lakedsp.com
Neumann	Berlin, Germany
NuReality	http://www.nureality.com
Paradigm Simulation	http://www.paradigmsim.com
QSound Labs	http://www.qsound.ca
Roland Corporation	http://www.rolandcorp.com/
Sonic Solutions	http://www.sonic.com/
Spatializer	http://www.spatializer.com
SRS Labs	http://www.srslabs.com

7. YHTEENVETO

Ihmiset ovat yleensä hyvin hämmästyneitä binauraalisten äänitteiden autenttisuudesta, vaikka niitä ei olisi ekvalisoitu mitenkään. Ääni-illuusiot on mahdollista toistaa täydellisinä vain oikean ekvalisoinnin avulla.

Äänityksessä on usein ongelmana se, että keinopää ottaa kaikki äänet - ei toivotutkin. Useissa stereoäänitystekniikoissa käytetään suuntaavia mikrofoneja, mutta keinopäät ottavat - kuten tuleekin ottaa - vastaan joka suunnasta tulevat äänet. Erityisesti digitaaliäänitysten suuren dynamiikan ansiosta tulee taltioitua paljon häiritseviä ääniä.

Helpoin tapa toteuttaa kuuntelukokeet on kuulokekuuntelu hyvässä kuunteluhuoneessa, sillä täydellinen kaiutintoisto ei ole vielä onnistunut, mutta se on teoriassa mahdollista.

Kaikki korvat-pää -antennin signaalien prosessoinnit ovat puhtaasti fysikaalisia ja lineaarisia. Siksi niitä voidaan simuloida.

Tulevaisuudessa binauraalinen tekniikka tulee käyttämään hyväkseen kuuloradan psykologisia malleja. Siihen tarvittavaa tekniikkaa ei toistaiseksi vielä ole. Massiivisen biologisen rinnakkaistietokoneen rakentaminen, kuten aivokuori, ei ole mahdollista vielä pitkään aikaan. Binauraalinen teknologia on viimeaikoina noussut tärkeäksi tutkimuskohteeksi ja on siten myös saanut taloudellisia resursseja. Kaupallisia sovelluksia alkaa tulla kiihtyvällä tahdilla. Binauraalinen tekniikka on nopeasti kehittymässä.

LÄHTEET JA VIITTAUKSET

Bauer B. B., Stereophonic earphones and binaural loudspeakers, JAES, Vol. 9 (2), 1961, s. 148.

Blauert J., Hearing - Psychological Bases and Psychophysics, kappale Psychoacoustic binaural phenomena.

Blauert J., 1983, Spatial Hearing, The psychophysics of human sound localization, Cambridge, The Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, 427 s.

Blauert J., Genuit K., 1993, Sound-Environment Evaluation by Binaural Technology: Some Basic Consideration. Journ. Acoust. Soc. Japan, Vol. 14, s. 139-145, 1993.

Blauert J., Els H., Schröter J., 1980, A Review of the Progress in External Ear Physics Regarding the Objective Performance Evaluation of Personal Ear Protectors. In Proc. Inter-Noise ‘80, s. 643-658, USA New York, 1980

Bodden M., 1993, Modeling Human Sound Source Localization and the Cocktail-Party-Effect. Acta Acustica 1, Vol. 1, s. 43-55, 1993.

Bodden M., Blauert J., 1992, Separation of Concurrent Speech Signals: A Cocktail-Party Processor for Speech Enhancement. In Proc. ESCA Workshop on: Speech Processing in Adverse Conditions (Cannes Mandleieu), s. 147-150. ESCA, 1992.

Cooper D. H., Bauck J. L., 1989, Prospects for Transaural Recording, JAES Vol. 37 Number 1/2, 1989, s. 3-19.

Damaske P., 1971, Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction, JAES, Vol. 50, 1971, s. 1109.

Els H., Blauert J., 1985, Measuring Techniques for Acoustic Models - Upgraded. In Proc. Internoise'85, Schriftenr. Bundesanst. Arbeitsschutz, Vol. Ib 39/II, s. 1359-1362. Bundesanst. Arbeitsschutz, 1985.

Els H., Blauert J., 1986, A Measuring System for Acoustic Scale Models. In 12th Int. Congr. Acoust., Proc. of the Vancouver Symp. Acoustics & Theatre Planning for the Performing Arts, s. 65-70, 1986.

Genuit K., 1984, A model for the description of outer-ear transmission characteristics, Doctor of Engineeing dissertation, Rheinish-Westphalian Technical University, Aachen, Germany. HRTF:ien kehittäminen pään ja ulkokorvan geometrian pohjalta.

Glasgal R., The Ear Pinna and Realism in Music Reproduction, `<URL:http://www.ambiophonics.org/pinna.htm>`

Griesinger D., 1989, Equalization and Spatial Equalization of Dummy-Head Recordings for Loudspeaker Reproduction, Journal of Audio Engineering, Society, 37 (1/2), s. 20-29.

Hammershøi D., Møller H., 1991, Free-field sound transmission to the external ear; a model and some measurements, In Fortschritte der Akustik, DAGA `91, Bochum, s. 473-476

Hammershøi D., Møller H., 1992, Artificial heads for free field recording; how well do they simulate real heads ? Proc. 14th Int. Congr. Acoust. Beijing 3 H6-7.

Hammershøi D., 1995/1, Binaural technique - a method of true 3D sound reproduction, Ph. D. dissertation, Aalborg Univ., Denmark. Aalborg University Press, ISBN 87-7307-516-7.

Hammershøi D., Møller H., 1995/2, Sound transmission to and within the human ear canal, to be published in JAES

Hammershøi Dorte, 1996, Fundamental Aspects of the Binaural Recording and Synthesis Techniques, AES Preprint Number: 4155th (C-8), Convention: 100, (1996 May 11-14)

Hammershøi D., Sandvad J., Binaural auralizartion. Simulating free field conditions by headphones, 96th Audio Eng. Soc. Conv. , Preprint 3863.

Hudde H., Schröter J., The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance, Acustica, Vol. 44, 1980, 302-7.

Jauhiainen T., 1995, Kuulo ja viestintä, Yliopistopaino.

Lehnert H., Blauert J., 1989, A Concept for Binaural Room Simulation. In Proc. IEEE-ASSP Workshop on Application of Signal Processing to Audio & Acoustics, USA-New Paltz NY, 1989.

Lehnert H., Blauert J., 1992, Principles of Binaural Room Simulation. Journ. Appl. Acoust., Vol. 36, s. 259-291, 1992.

Maijala P., Kaaresoja T., 1996, Keino Suuntonen, Akustiikan ja äänenkäsittelyteknii-kan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu <URL:http://secretfriend.tky.hut.fi/Keino.html>

Møller H., 1989, Reproduction of Artificial-Head Recordings Through Loudspeakers, Journal of Audio Engineering, Society, 37 (1/2), 1989, s. 30-33.

Møller H., 1992, Fundamentals of binaural technology, Applied Acoustics 36, 1992, s. 171-218

Møller H., Hammershøi D., Jensen C. B., Hundebøll, J. V., 1992/1, Transfer characteristics of headphones: Measurements on 40 human subjects, presented at the 92nd Convention of the Audio Engineering Society, Vienna, Austria, 1992.

Møller H., Sørensen M. F., Hammershøi D., Jensen C. B., 1992/2, How well do existing binaural systems work?, in preparation, preliminarily reported in (Hammershøi and Møller, Artificial heads for free..,1992).

Møller H., Hammershøi D., Jensen C. B., Sørensen M. F., 1995/1, Transfer characteristics of headphones measured on human ears, J. Audio Eng. Soc., Vol. 43, (4), s. 203-217.

Møller H., Sørensen M. F., Hammershøi D., Jensen C. B., 1995/2, Head-related transfer functions of human subjects, J. Audio Eng. Soc. Vol. 45 (5), s. 300-321.

Møller H., Sørensen M. F., Hammershøi D., Jensen C. B., 1995/3, Binaural technique: Do we need individual recordings, J. Audio Eng. Soc., Vol. 44, N. 6, s. 451-, 1996

Møller H., Clemen B. J., Hammershoi D., Sørensen M., 1996, Using a Typical Human Subject for Binaural Recording, AES Preprint N. 4157 (C-10), 100th Conv., (1996 May 11-14).

Pösselt C. et al., Generation of Binaural Signals for Research and Home Entertainment. In Proc. 12th Int. Congr. Acoust. Vol. I, B1-6, CND-Toronto, 1986.

Salava T., Transaural Stereo and Near-Field Listening, AES, Vol. 38, Number 1, s. 40

Schomaker et al., Esprit Project 8579 / MIAMI, 1995, <URL:http://www.cogsci.kun.nl/~miami/taxonomy/node1.html>

Schröter J., The Use of Acoustical Test Fixures for the Measurement of Hearing-Protector Attenuation, Part I: Review of Previous Work and the Design of an Improved Test Fixure. Journ. Acoust. Soc. Am., Vol. 79, s. 1065-1081, 1986.

Soulodre G. A., Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields, ASA 125th Meeting Ottawa 1993 May 2aAA10.

Sunear 1996, Binaural Recording for Headphone Experiences, Binaural Frequently Asked Questions, <URL:http://www.btown.com/binaural.html>

Theile G., 1981, Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereophonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungabbild., Rundfunktech. Mitt., Vol. 25, s. 67-73.

Wightman F. L., Kistler D., 1992, A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction, JASA, Vol 91, No. 3, Feb,1992.

Xiang N., Blauert J., 1991, A Miniature Dummy Head for the Binaural Evaluation of Tenth-Scale Acoustic Models. Journ. Applied Acoustics, Vol. 33, s. 123-140, 1991.

Xiang N., Blauert J., 1993, Binaural Scale Modelling for Auralization and Prediction of Acoustics in Auditoria. Journ. Appl. Acoust., Vol. 38, s. 267-290, 1993.