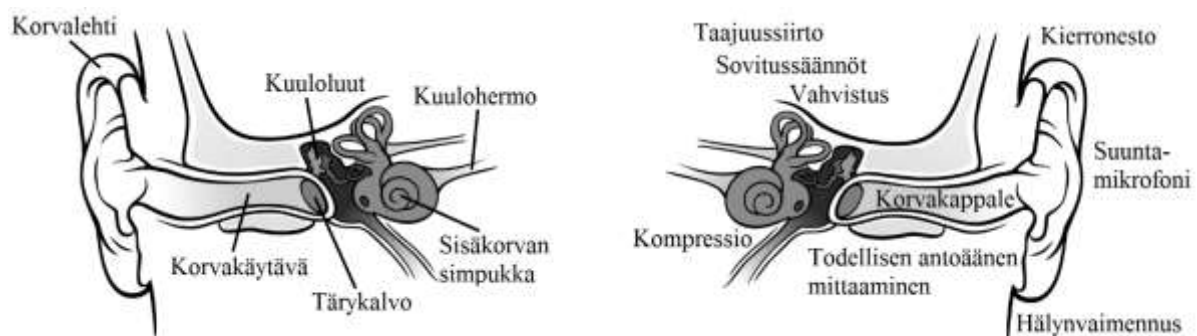


KATSAUS NYKYAIKAISTEN KUULOKOJEIDEN TEKNIikkaAN JA TOIMINTAPERIAATTEISIIN

Ville Sivonen

Akustisten, ääntä vahvistavien kuulokojien keskeisiä osia ovat yksi tai useampi mikrofoni, digitaaliset signaalinkäsittelypiirit ja vahvistin, kuuloke, mahdolliset vastaanottimet lisälaitteille, kuulokojen toimintaa säätelevät kytkimet tai mahdollinen kaukosäädin sekä kokeen virtalähde, joka vielä tänä päivänä on ladattavan akun sijaan useimmiten kertakäyttöinen paristo. Kuulokojen mikrofonijärjestelmä muuntaa akustisen äänisignaalin sähköiseksi, joka muunnetaan edelleen käsittelyä ja muokkaamista varten digitaalisesti signaaliksi. Signaalinkäsittelyn jälkeen koke muuntaa äänen takaisin sähköiseksi signaaliksi, jonka kokeen kuuloke muuntaa vahvistetuksi ääneksi korvakäytävässä. Käytännössä kaikki nykyaikaiset kuulokojet ovat toimintaperiaatteeltaan digitaalisia eli ääntä käsitellään digitaalisessa muodossa. Digitaalinen signaalinkäsittely mahdollistaa äänen monipuolisen muokkaamisen ja eri kuuntelutilanteisiin mukautuvan toiminnan. Kuulokojen ääni johdetaan korvakäytävään usein yksilöllisesti muotoillun korvakappaleen avulla. Korvakappaleen tehtävä on kytkeä kokeen ääni korvakäytävään hallitusti ja vaikuttaa omalta osaltaan saavutetun vahvistuksen määrään.

Kuulokoke pyrkii hyödyntämään jäljellä olevaa kuulokykyä mahdollisimman laajasti. Kuvan 1 vasemmalla puolella on esitetty korvan keskeisiä osia, ja vastaavasti oikealla puolella on esitetty nykyaikaisen kuulokojen keskeisten toimintojen periaatteellinen sijoittuminen korvan toimintaa ja kuulonaleneman sijaintia ajatellen. Seuraavassa käydään läpi kuulokojien tekniikkaa ja toimintaperiaatteita 1) äänen kuuluvuuden ja 2) eri ääniympäristöihin sopeutumisen kannalta.



Kuva 1. Kuvassa vasemmalla on korvan keskeisiä osia ja oikealla on akustisen kuulokojen keskeisten toimintojen periaatteellinen sijoittuminen korvan toimintaa ja kuulonaleneman sijaintia ajatellen. Kuva on muokattu Chittka & Brockmann (2009) pohjalta.

Kuuluvuuden parantaminen

Kuulokojeen keskeisin tehtävä on kuulonaleneman kompensoiminen puheen ja ympäristön äänien kuuluvuutta parantamalla. Koska kuulonaleneman aste vaihtelee usein taajuuden suhteen, käsittelee koje ääntä taajuuskaistoittain eri kanavilla eri tavalla. Käytettävissä olevien kanavien määrä vaihtelee kojeen toimintaperiaatteista ja hintaluokasta riippuen muutamista muutamiin kymmeneen, ja suuremmalla kanavamäärällä mahdollistetaan kojeen tarkempi sovittaminen yksilölliseen, korvakohtaiseen kuulonalenemaan. Kuulonalenema voi olla johtumistyyppinen, jolloin esimerkiksi korvakäytävän, tärykalvon tai kuuloluiden toiminta on normaalista poikkeavaa (Kuva 1). Tällöin ääntä *vahvistamalla* saadaan kuulonaleneman vuoksi heikentynyttä kuuluvuutta parannettua. Suurin osa kuulonalenemista on kuitenkin sensorineuraalisia liittyen sisäkorvan tai kuulohermion normaalista poikkeavaan toimintaan. Sisäkorvaperäisessä kuulonalenemassa hiljaisten äänien kuuluvuus heikkenee voimakkaita ääniä enemmän (ns. *kuuluvuuden rekrutment*; Jauhiainen, 2008). Tämän vuoksi kaikkia äänenvoimakkuuksia samalla tavalla vahvistamalla koetaan kuulokojeen vahvistamat voimakkaat äänet epämiellyttävinä ja liian voimakkaina. Näin ollen kuulokojeella vahvistettua ääntä joudutaan tyypillisesti *kompressoimaan* eli äänen voimakkuusvaihtelua (dynamiikkaa) supistetaan, ja tällöin hiljaiset äänet vahvistuvat kojeessa voimakkaita ääniä enemmän. Kompression tavoitteena on myös välttää vahvistetun äänen kuulolle aiheuttama lisävaurio.

Monikanavainen, eri tavoin eri taajuusalueilla toimiva vahvistus ja kompressio ovat nykyaikaisen kuulokojeen keskeisiä toimintoja kuuluvuuden parantamiseksi. Kuulontutkimusten avulla määritetään kuulonaleneman tyyppi ja vaikeusaste sekä äänen epämiellyttävyyskynnys, ja kojeen *sovitussääntö* määrittelee, millä tavoin ääntä annostellaan kyseiseen kuulonalenemaan kanavakohtaista vahvistusta ja kompressiota muokkaamalla (Viitanen, 2009; Sivonen, 2015a). Kojesovitussääntöjä on useita erilaisia, niin yleisiä kuin laitevalmistajakohtaisiakin. Yleiset sovitussäännöt perustuvat tutkimuksiin ja niiden toimintaperiaatteet ovat vapaasti saatavilla (Dillon, 2012). Laitevalmistajakohtaisista sovitussäännöistä ei välttämättä ole vertailukelpoista tietoa käytettävissä ja nämä saattavat pyrkiä esimerkiksi hyödyntämään optimaalisesti kyseisen kojetyypin signaalinkäsittelyarkkitehtuuria.

Voimakkaat korvantauskuulokojeet kykenevät vahvistamaan ääntä jopa yli 80 dB. Osa korvakäytävään johdetusta vahvistetusta äänestä vuotaa korvan ulkopuolelle ja kytkeytyy takaisin kuulokojeen mikrofoniin. Tällöin koje voi alkaa vahvistamaan jo kertaalleen vahvistamaansa ääntä, mikä ilmenee kojeen äänen kiertona tai vinkumisena. Ilman *kierronestoa* äänen kierto lakkaa vasta,

kun koje pienentää vahvistustaan. Jotta kojeen antama kuuluvuus säilyisi mahdollisimman hyvänä, on tehokas kierronesto oleellinen osa nykyaikaisia, digitaalisia kuulokojeita, ja kierronesto kyetään nykyään tekemään kuuluvuuden siitä merkittävästi kärsimättä. Äänen kiertoa voidaan hallita sähköisesti digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla vaikuttamalla kanavakohtaiseen vahvistukseen, vahvistetun signaalin vaiheeseen tai taajuuteen, tai tuottamalla vastakkaisvaiheinen signaali, joka pyrkii kumoamaan kiertävän äänisignaalin. Lisäksi *korvakappaleen* ominaisuudet ja tiiviys korvakäytävässä vaikuttavat äänen kierron ilmenemiseen.

Jos jäljellä oleva sisäkorvan kuulo jollain taajuusalueella on hyvin heikko, voi kuulokoje joissain tapauksissa siirtää kyseisen taajuusalueen äänienergiaa kuulokyvyltään paremmalle taajuusalueelle äänen kuuluvuuden parantamiseksi. Kuulonalenema on usein suurilla taajuuksilla (korkeat äänet) pieniä taajuuksia (matalat äänet) suurempi. Näistä osalla kuulonalenema on sellainen, että puheinformaatiota ei välity riittävästi kuuloaivokuorelle siitä huolimatta, että ääni näillä taajuuksilla voitaisiin saada vahvistettua kuuluvaksi. Liiallinen suurten taajuuksien vahvistus voi myös sekoittaa kuuluvuutta pienemmillä taajuuksilla (Dillon, 2012). *Taajuussiirtoa* hyödyntävät kuulokojeet siirtävät puheinformaatiota alueille, joilla äänen tunnistus- ja erottelukyky on parempi. Tyypillisesti ääntä siirretään alaspäin taajuuden suhteen. Taajuussiirto voi perustua useisiin erilaisiin matemaattisiin sääntöihin ja kukin sääntö voidaan toteuttaa erilaisilla signaalinkäsittelytekniikoilla. Vaikka taajuussiirto voi parantaa kuuluvuutta ja puheen ymmärrettävyyttä, on taajuussiirrolla myös haittavaikutuksia, sillä se heikentää kuulojärjestelmälle tarjottavaa taajuusresoluutiota. Koska taajuussiirtoon täytyy totutella, voi siitä luopuminen tai siirron toiminnan muuttuminen vaikeuttaa esimerkiksi kuulokojeen vaihtoa toiseen.

Kuulokojeiden sovitussäännöt perustuvat oletuksiin korvakäytävän keskimääräisestä koosta. Tärykalvon ja korvakappaleen väliin jäävä tilavuus ja sen akustiset ominaisuudet ovat kuitenkin yksilöllisiä niin lapsilla kuin aikuisillakin, ja ne vaikuttavat kojeesta saatuun vahvistukseen eri taajuusalueilla. *Todellisen antoäänen mittausten* (Peräsalo, 2016) avulla voidaan varmistaa, että kuulokoje tuottaa korvakäytävään sovitussäännön mukaisen vahvistuksen juuri kyseiseen korvaan kytkettynä. Ensimmäisten sukupolvien digitaaliset kuulokojeet ja sen aikaiset mittamenetelmät eivät antaneet luotettavaa kuvaa todellisesta kojevahvistuksesta. Nykyaikaisten kojeiden ja puheen kaltaisten mittasignaalien avulla voidaan todellisen antoäänen mittauksilla varmistaa tavoitteen mukainen vahvistus sekä riittävä kuuluvuus ja äänen miellyttävyys voimakkuudeltaan eritasoisille äänille.

Sopeutuminen ääniympäristöihin

Yleisen elektroniikan ja tietotekniikan kehityksen ansiosta on myös digitaalisten kuulokojeiden signaaliprosessorien laskentateho kasvanut huomasti. Äänen vahvistamisen ja kuulonalenemaan sovittamisen lisäksi nykyaikaiset kojeet analysoivat jopa kymmeniä ääniympäristön eri piirteitä kuulokojeen toiminnan ohjaamiseksi (Büchler, 2005). Kojee voi kerätä tietoa esimerkiksi ympäristön yleisestä äänenvoimakkuudesta, puheen kaltaisesta voimakkuudeltaan vaihtelevien signaalien esiintymisestä tai puheen ja taustahälyn arvioidusta voimakkuuserosta eli signaali-kohinasuhteesta. Tämän perusteella koje voi luokitella kuunteluympäristön esimerkiksi puhetta, puhetta ja taustahälyä, pelkkää taustahälyä tai musiikkia sisältäväksi, ja valita luokittelun perusteella kuhunkin kuunteluympäristöön parhaiten sopivaa äänen esikäsittelytekniikkaa. Esikäsittelyn, kuten *suuntamikrofonin* tai *hälynvaimennuksen* tarkoitus on parantaa puheenkaltaisten, yleensä edestä saapuvien äänien kuuluvuutta muihin ympäröiviin ääniin verrattuna (Sivonen, 2016).

Tällaisen automaattisen, ääniympäristöön adaptoituvan toiminnan lisäksi kuulokojeet voivat tilastoida kojeen ääniympäristöjä, päivittäistä käyttöä sekä ohjelmien ja äänenvoimakkuuden säätömuutoksia ns. lokiin. Lokitietojen avulla saadaan käsitys kojeen käytöstä, ja tietojen perusteella voidaan tehdä muutoksia esimerkiksi erilaisiin kuuntelutilanneohjelmiin tai kojeen yleiseen vahvistukseen. Joissain tapauksissa koje voidaan ohjelmoida tekemään vahvistuksen säätöä automaattisesti lokitietojen pohjalta, jos esimerkiksi kojeen käyttäjä tietyssä ääniympäristössä muuttaa vahvistusta johdonmukaisella tavalla.

Kuulokojeisiin kytkettävät lisälaitteet, kuten etämikrofonit tai puhelinkuuntelun apuvälineet ovat myös hyödyllisiä erilaisiin kuunteluympäristöihin sopeutumisessa (Sivonen, 2015b). Uusimmissa kuulokojeissa lisälaitteet käyttävät langatonta digitaalista tiedonsiirtoa mahdollisimman häiriöttömän äänensiirron toteuttamiseksi. Tällä hetkellä digitaalisille lisälaitteille ei ole voimassa olevaa yhteistä standardia, ja ilman erillistä vastaanotinta laitteet ovat valmistajakohtaisia. Kuulokojemerkin vaihtuessa toiseen joudutaan usein myös vaihtamaan lisälaitteita, mistä seuraa merkittäviä lisäkustannuksia. Yleismaailmallinen induktiovastaanotin pitääkin edelleen pintansa myös uusissa kuulokojemalleissa. Apuvälineiden lisäksi joissain uusissa kuulokojeissa on tiedonsiirtoa vasempaan ja oikeaan korvaan sovitettujen kojeiden välillä. Tämän tarkoituksena on synkronoida kojeen kuunteluympäristöön säätöminen tai tehokkaan suuntamikrofonikeilan muodostaminen molempien kojeiden mikrofonisignaaleja yhdistämällä.

Kirjallisuutta

Büchler M., Allegro S., Launer S., Dillier N. (2005). Sound classification in hearing aids inspired by auditory scene analysis. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 18, 2991-3002.

Chittka L., Brockmann A. (2009). Perception space – the final frontier. *PLoS Biology* 3(4), e137.

Dillon H. (2012). *Hearing Aids*, 2. laitos. Sydney: Boomerang Press.

Jauhiainen T. (2008) *Audiologia*. Helsinki: Duodecim.

Peräsalo P. (2016) Todellisen antoäänen korvakäytävämittaus (REM) aikuisten kuulokojekuntoutuksessa: teoria, suositukset ja suomalainen käytäntö. Tampereen ammattikorkeakoulu: Hyvinvointiteknologian koulutus, ylempi amk.

Sivonen V. (2015a) Sovitussääntöjen teoriaa. Teknisen audiologian koulutuspäivät, Helsinki 16.-17.11.2015.

Sivonen V. (2015b) Katsaus kuulolaitteiden apuvälinetekniikkaan. Satakieliseminaari, Seinäjoki 23-25.9.2015.

Sivonen V. (2016) Kuulolaitteiden meluvaimennus. Satakieliseminaari, Imatra 29.-30.9.2016.

Viitanen L. (2009) Diskanttikuulovika ja sovitusalgoritmit/sovitussäännöt. Teknisen audiologian koulutuspäivät, Helsinki 16.-17.11.2009.