

IHMISEN JA KEINOPÄÄN SUUN SUUNTAAVUUS

Teemu Halkosaari (1), Markus Vaalgamaa (2), Juha Backman (2)

(1) TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, PL 3000, 02015 TKK, Espoo

(2) Nokia Mobile Phones, 00045 NOKIA GROUP, Helsinki

Teemu.Halkosaari@hut.fi, Markus.Vaalgamaa@nokia.com, Juha.Backman@nokia.com

1 JOHDANTO

Taajuusvastemittaukset puhelimien ja niiden lisälaitteiden mikrofoneille suoritetaan käyttäen keinopääsimulaattoreita. Keinopään tarkoitus on muistuttaa mitoiltaan ja akustisilta ominaisuuksiltaan oikean ihmisen päätä ja mahdollisesti myös ylävartaloa. Keinopään suu on varustettu riittävän suorituskykyisellä kaiuttimelementillä, jotta keinosuu tuottaa ääntä ainakin puhelimissa käytetyllä kapealla taajuuskaistalla. Keinopään ominaisuudet sekä sen käyttö puhelinlaitemittauksissa on määritelty standardeissa. Standardeissa pään suuntaavuus on määritelty pisteittäin lähinnä suun edessä kaukokentässä [1][2].

Tulevaisuuden puhelimien taajuuskaista laajenee nykyisestä noin 300Hz-3400Hz:sta standardiehdotusten mukaiseen laajempaan kaistaan 100Hz-7kHz. On ilmeistä, että laajakaistaisissa tilanteissa käytettyjen keinopäiden ja oikean ihmisen äänentuoton suuntaavuuden välille muodostuu eroja. On huomioitava, että standardeissa vaatimukset keinopään suuntaavuudelle on määritelty hyvin karkeasti, kapealla kaistalla ja lähinnä pisteissä, jotka eivät ole lähellä mittauksissa käytettyjä puhelimien ja niiden lisälaitteiden mikrofonien paikkoja.

On varsin yllättävää, että kirjallisuudessa ei ole löydettävissä tutkimuksia keinopäiden suuntaavuudesta verrattuna oikean ihmisen suun suuntaavuuteen. On kylläkin löydettävissä artikkeleita, joissa on yleisellä tasolla pyritty mittaamaan ja myös mallintamaan keinopään suuntaavuutta. Vastaavanlaisia tarkasteluja on tehty myös mittaamalla joukko koehenkilöitä [3]-[9].

Tämän tarkastelun taustaksi suoritettiin monikanavamittaukset sekä keinopäälle että n. kymmenelle koehenkilölle. Tuloksissa on tarkasteltu sekä keinopään ja ihmisen keskiarvoistettuja suuntaavuuksien eroja että itse suuntaavuutta mallien tukemana. Seuraavassa kappaleessa esitellään käytetyt mallit, jonka jälkeen mittausjärjestelyt. Lopuksi tarkastellaan tuloksia ja esitetään johtopäätökset.

2 PÄÄN JA VARTALON MALLINTAMINEN

2.1 Pallo ja pyöreä mäntälähde

Päätä ja siinä olevaa suuta äänilähteenä voidaan mallintaa yksinkertaisella pallo- ja mäntälähdemallilla. Mallissa oletetaan, että pää on tasainen pallo ja suu pyöreä. Suu on siis pyöreä osa pallon pintaa, jonka liike on säteittäistä (kts. kuva 1) [10]. Analyyttinen ratkaisu painekentälle voidaan esittää seuraavalla yhtälöllä

$$p(r, \mathbf{q}) = -j\omega \frac{\mathbf{r}_0 u_0}{2k} \sum_n \frac{h_n^{(2)}(kr)}{h_n^{(2)}(kR_0)} [P_{n-1}(\cos \mathbf{q}_0) - P_{n+1}(\cos \mathbf{q}_0)] P_{n+1}(\cos \mathbf{q}). \quad (1)$$

Kaavassa esiintyy mäntälähteen nopeus u_0 , ilman tiheys ρ_0 , aaltoluku k , kulmataajuus ω ja mallin fysikaaliset dimensiot eli suun avauma esitettynä kulmana θ_0 sekä pallon säde R_0 (kts. kuva 1). P_n ja h_n ovat Legendren ja Hankelin funktioita. Mallin pyörähdyssymmetrisyydestä johtuen paikkakoordinaatit on määritelty etäisyytenä r pallon keskipisteestä ja kulmana \mathbf{q} männän akseliin nähden. Mallia on käytetty jatkossa esitetyissä tarkasteluissa vertaillen kahden kenttäpisteen painekenttien suhdetta.

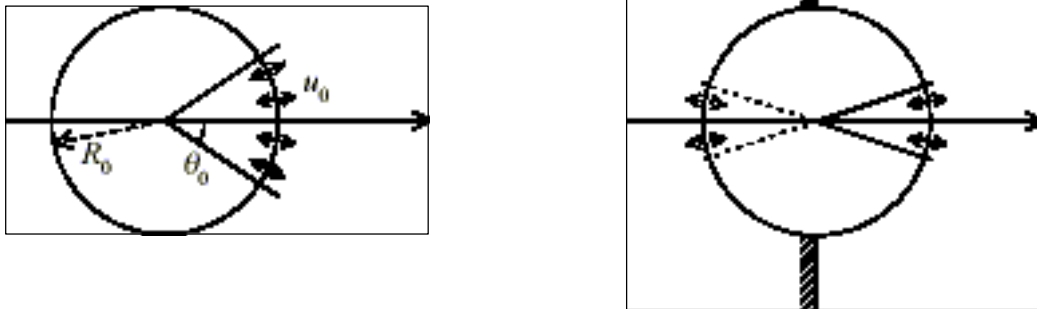
Tämän mallin mukainen suuntaavuus riippuu ainoastaan kahdesta parametrilla: pään säteestä ja suun avautumiskulmasta. Pään koko vaikuttaa lähinnä pienten taajuuksien suuntaavuuteen, etenkin siihen, millä taajuusalueella säteily muuttuu täysin ympärisäteilevästä puoliavaruuteen rajautuneeksi. Pään koko voidaan valita kohtuullisen vapaasti. Tässä on säteelle käytetty arvoa 10 cm. Suun avautumiskulma taas määrittelee suuntaominaisuudet suuremmilla taajuuksilla, ja tämän parametrin sovittaminen mittaustuloksia vastaavaksi on tärkeää.

2.2 Kehittyneempiä malleja

Keho vaikuttaa äänikenttään erityisesti kaukokentässä, jolla tarkoitetaan tässä yhteydessä yli 10cm etäisyyksiä päästä. Yksinkertaisimmillaan vartalo voidaan mallintaa täysin heijastavana pintana. Edellä esitettyyn malliin voidaan asettaa ääretön huulitason suuntainen heijastava pinta keskelle päätä. Pääpiirteet heijastavan pinnan aiheuttamasta heilahtelusta vasteisiin voidaan nähdä kuvasta 3. Heijastavan pinnan vaikutus analyttisesti voidaan laskea summaamalla vapaan kentän ratkaisuun kuvälähde (kuva 1). Käyttäen tätä hyvin pelkistettyä geometriaa ja lauseketta (1) vapaan tilan säteilylle kokonaisäänipaine p_{tot} on

$$p_{tot}(r, \mathbf{q}) = p(r, \mathbf{q}) + p(r, \mathbf{q} + \mathbf{p}). \quad (2)$$

Edellä mainitun kaltaista vartalon mallia ovat käyttäneet esimerkiksi Sugiyama ja Irii artikkelissaan [9]. Tämä lisäksi he ovat edistyneemmällä mallilla mallintaneet pään soikeutta ns. venyetyllä pallolla (prolate spheroid).



Kuva 1. Vasemmalla pallo ja mäntä -malli ja oikealla siihen liitettyä ääretön heijastava pinta. Kuvaan on hahmoteltu myös peililähde.

3 MITTAUSJÄRJESTELYT

3.1 Laitteisto

Akustiset mittaukset suoritettiin kaiuttomissa huoneissa Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion tiloissa Espoossa sekä Nokian Matkapuhelinten akustiikkalaboratoriossa Salossa. Käytetyt kaiuttomat huoneet täyttivät vapaakenttäkriteerit tarkastellulla taajuuskaistalla.

Monikanavaäänityksessä käytettiin siihen erityisesti suunniteltua laitetta IOtech-yhtiön valmistamaa tallennusyksikköä (IOtech WaveBook/516, 16-bit 1-MHz Data Acquisition System). Järjestelmä pystyi näytteistämään ja tallentamaan tietokoneen kovalevyllä LPT-kaapelin kautta kahdeksan rinnakkaista mittaussignaalia reaaliaikaisesti. Järjestelmää ohjataan Windows-pohjaisella käyttöliittymällä, jonka avulla signaalin mittauksen aikainen tarkkailu on mahdollista. Mittauksissa käytettiin 32kHz:n näytteenottotaajuutta ja jokaiselle kanavalle 16-bitin tarkkuudella. Elektreettimikrofonit biasoitiin erillisellä paristokäyttöisellä yksiköllä. Tämän lisäksi jokainen mikrofoni oli kytketty etuvahvistimeen (E.A.A. Professional Stereo Preampfier, PSP-2).

3.2 Mittauspisteet ja mikrofonit

Mittauspisteiden valinnassa rajoittava tekijän oli lähinnä niiden lukumäärä, kahdeksan. Yksi mikrofoneista asetettiin kaukokenttään puolen metrin etäisyydelle suoraan suun eteen ns. huulitason kohtisuoralle. Tätä pistettä käytettiin referenssipisteenä ja myös kaukokenttätarkasteluissa. Muut mittauspisteet sijoitettiin kohtiin, joissa puhelinten ja lisälaitteiden mikrofonit ovat niitä käytettäessä. Sijainnit on esitetty taulukossa 1 ja kuvassa 2.

Taulukko 1. Mittauspisteet referoituna huulitason kohtisuoraan ja horisontaaliin (H) sekä vertikaaliin (V) poikkeamaan siitä (mittauspisteet 1-5). Mittauspisteet rinnan päällä on referoitu etäisyytenä kurkusta ja poikkeamana rinnan keskilinjasta sivulle (mittauspisteet 6-8). Taulukossa on myös esitetty mitä laitetta mittauspiste vastaa.

Mikrofonikanava	Etäisyys akselilla (mm)	Akselipoikkeama (mm)	
1	500	0	
2	0	H 60	iso puhelin
3	-10	H 70 V -40	iso puhelin
4	-30	H 85 V 10	pieni puhelin
5	-70	H 100 V 30	boom-headset
Rinnan päällä:			
6	50	0	headset
7	200	0	headset
8	0	100	headset

Mittamikrofoneina käytettiin kahdeksaa Sennheiserin KE 4-211-2 elektreettimikrofonia. Mikrofoneja käytettiin mittauksissa aina saman mittauspisteen mittaamiseen. Näin tuloksista pystyttiin helposti kompensoimaan kalibroinnissa havaitut lievät taso erot. Mikrofonit kiinnitettiin kohdistamisen helpottamiseksi erityisesti tarkoitusta varten rakennettuun kypärään ja rinnan päälliset mikrofonit kiinnitettiin toisiinsa rautalankarungolla (kuva 2).



Kuva 2. Mittapisteet ja mittaustilanne keinopäälle. Kuvassa mittauksissa käytetty B&K 4128 C sekä Sennheiserin elektreettimikrofonit taulukossa 1 esitetyissä mittapisteissä.

3.3 Mittaukset keinopäälle

Keinopäällä mitattiin vasteet kaikkiin kahdeksaan mittauspisteeseen käyttäen MRP:hen (Mouth Reference Point, 2,5cm suoraan suun edessä) kompensoitua valkoista kohinaa. Mittauksissa käytettiin B&K:n keinopäämallia 4128 C. Keinopää oli kaikissa mittauksissa puettuna B&K:n puhelinlisläitemittauksia varten suunniteltuun liiviin.

Lisäksi suoritettiin erilliset MLS-pohjaiset mittaukset APWin-mittausohjelmistolla. Tarkoituksena oli mitata siirtofunktio MRP:n ja mittapisteen 1 välillä sekä koko keinopääsimulaattorille että pelkälle keinopääsimulaattorin päälle. Täten pelkän pään ja pään sekä vartalon vasteita vertaamalla voidaan päätellä vartalon vaikutusta kaukokenttään. Tässä mittauksessa käytettiin MRP:ssä 1/4-tuumaista ja puolen metrin etäisyydellä 1/2-tuumaista B&K:n kondensaattorimikrofonia.

3.4 Mittaukset koehenkilöille

Koehenkilöille suoritettiin mittaukset edellä esitetyn kaltaisella mikrofonijärjestelyllä. Koehenkilö istui kaiuttomassa huoneessa ja häntä pyydettiin olemaan mahdollisimman paikallaan mittauksen ajan. Puhemateriaalina nauhoitukseen käytettiin lausetta: ”Kaksi vuotta sitten kävimme ravintola Gabrielissa ja soimme siellä padallisen fasaania banaalilla höystettynä.”. Lause sisältää kaikki suomen kielessä käytetyt äänteet. Koehenkilöitä pyydettiin puhumaan rauhallisesti mutta kuitenkin luonnollisesti artikuloiden.

Mittaukset toistettiin 13 koehenkilölle, joista 5 oli naista. Koehenkilöt olivat iältään 20 ja 30 vuoden ja pituudeltaan 160 ja 190 senttimetrin väliltä.

4 TULOKSET

Mittauksissa saadut monikanavaäänitykset analysoitiin Matlab-ympäristössä. Viiveet kanavien välillä kompensoitiin näytteen tarkkuudella. Jokaisen tarkastellun kanavan ja käytetyn referenssikanavan välille laskettiin taajuusvaste-estimaatit T_{xy} riippuen siitä kummassa kanavassa on enemmän kohinaa, eli käytännössä kumpi kanava oli kauempana suusta [11]. P_{xy} ja P_{xx} ovat signaalien välinen ristispektriestimaatti ja signaalin autospektriestimaatti

$$T_{xy} = \frac{P_{xy}}{P_{xx}} = \frac{P_{yy}}{P_{yx}}. \quad (3)$$

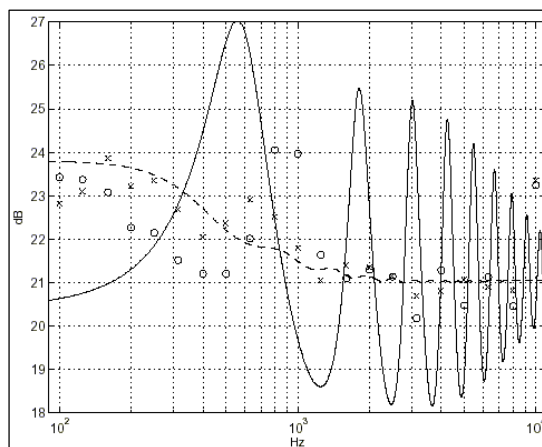
Lisäksi kanavien välille laskettiin koherenssiestimaatit sekä jokaiselle kanavalle signaali-kohinasuhde (SNR). SNR laskettiin käyttäen kohinareferenssinä nauhoituksissa kohtia, joissa ei ollut hyötysignaalia. Kaikista nauhoituksista merkattiin äänteet erillisiksi ja siten myös aktiivinen puhe, jolloin analyyseihin ei turhaan tullut sisällytettyä puheen taukoja ja ylimääräisiä hiljaisuuksia.

Kaikissa signaalien ikkunoinneissa ja FFT-muunnoksissa (Fast Fourier Transform) käytettiin seuraavia parametrejä: Hanning-ikkunointi, FFT:n pituus 1024 näytettä ja 50% lomit. Ikkunoinnin koko valittiin siten, että ainakin kaksi näyteikkunaa osuisi jokaisen äänten kohdalle. Näin äänteiden erillinen tutkiminen oli myös mahdollista estimaatin kärsimättä ja taajuusresoluution ollessa kuitenkin riittävä.

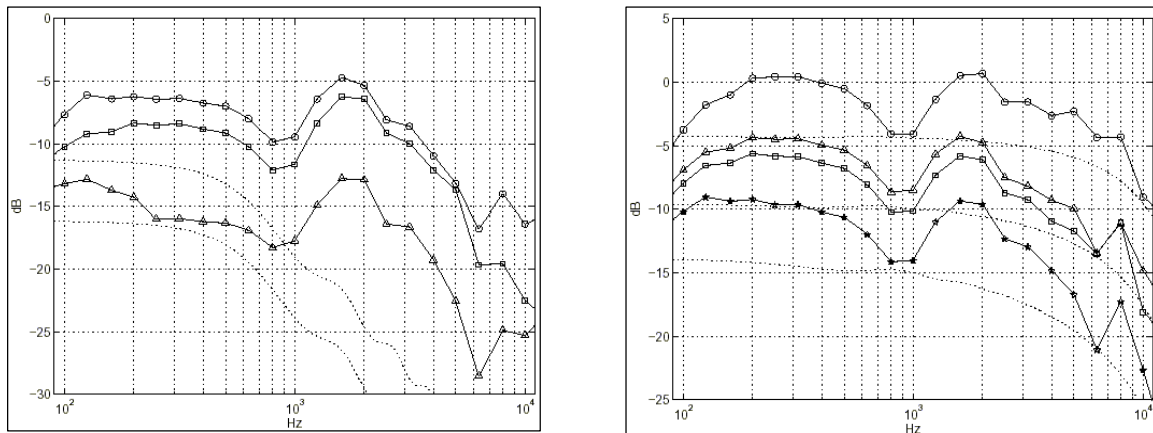
Kaikki esitetyt taajuusvastetulokset ovat keskiarvoistettu 1/3-oktaavikaistoittain. 1/3-oktaavikaistan sisällä taajuuskomponentit painotettiin koherenssilla estimaatin parantamiseksi. Tuloksien esityksessä on keskitytty taajuuskaistaan 100Hz-10kHz koska mittauksissa käytetyn keinosuun toistovaste tämän kaistan ulkopuolella on heikko.

4.1 Vartalon vaikutus kaukokentässä

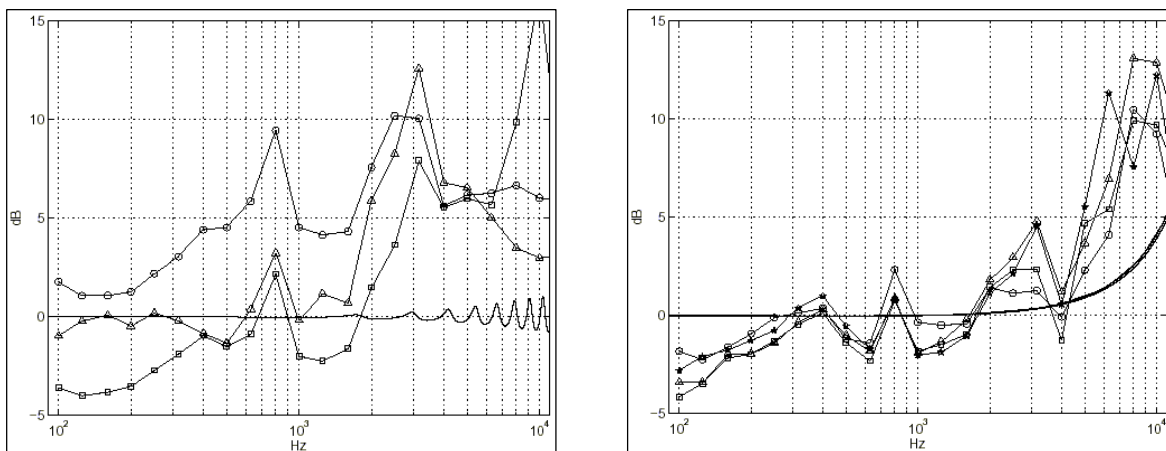
Yksi tarkastelun lähtökohtia oli tutkia vartalon vaikutusta varsinkin kaukokentässä. Tämä siksi että n. 1kHz:n kohdalla vartalolla on merkittävä korostava vaikutus, jos tarkastellaan esimerkiksi kuvan 3 tapausta. Kuvassa on esitettynä taajuusvasteet mittapisteestä 1 MRP:hen. Malli ennustaa kohtuullisen hyvin mainitun korostuman. Verrattaessa mallia ja mittauksia on huomioon otettava mallin ja todellisen pään dimensioiden ero. Suu on merkittävästi pään keskilin- ja alapuolella. Täten heijastuma rinnasta tapahtuu nopeammin kuin mallissa ja korostuma on siten siirtynyt mallissa pienemmälle taajuudelle. Täysin heijastava pinta mallissa näkyy pienillä ja suurilla taajuuksilla mallin ja mittausten selkeänä erona. Ihmisen rinta on keskitaajuuksilla heijastava ja muuten aallonpituuteen nähden liian pieni tai suurilla taajuuksilla äänen absorboiva.



Kuva 3. Vartalon vaikutus siirtofunktiona mittapisteestä 1 MRP:hen. Tasainen ja katkoviiva kuvaavat yksinkertaista pallo ja mäntä –mallia ja mallia johon on liitetty ääretön heijastava pinta. Ympyrät ovat mitattu vaste koko keinopäälle ja ristit ilman vartaloa.



Kuva 4. Keinopään suuntaavuus referoituna MRP:hen. Vasemmalla ylhäältä alas mittapisteteet 6, 7 ja 8 ja katkoviivalla mittapisteisiin 6 ja 7 lasketut mallit, joissa on käytetty heijastavaa pintaa. Mallissa mittapisteet sijoitettu heijastavalle pinnalle. Oikealla ylhäältä alas mittapisteteet 2, 3, 4 ja 5 ja katkoviivalla ylhäältä alas mittapisteteet 2, 4 ja 5 laskettuna suoralla mallilla.



Kuva 5. Koehenkilöille suoritetujen mittausten ja keinopään ero referoituna mittapisteteeseen 1. Käyrissä on käytetty samoja merkintöjä kuin kuvassa 4. Tasainen viiva on mallin antama ero samoille pisteille, jotka on mallinnettu kuvassa 4. Mallissa vasemmalla on käytetty heijastavaa pintaa, oikealla ei. Malleissa on käytetty kahta eri suun kokoa (suuaukon säde): 5mm ja 14mm (jälkimmäinen vastaa keinopään suun alaa).

4.2 Keinopään suuntaavuus

Vaikka tämän tutkimuksen keskeisin kysymys oli tutkia ihmisen ja keinopään eroja, on myös tarkasteltava suuntaavuutta sellaisenaan. Tässä yhteydessä tulokset on referoitu MRP:hen (kuva 4). Kuvissa näkyy selvästi miten siirryttäessä suun edestä sivummalle (2->5) korkeat taajuudet vaimenevat voimakkaammin keski- ja mataliin taajuuksiin verrattuna. Kuvissa näkyvä yhteismuotoinen notko n. 1kHz:n kohdalla johtuu kahden eri mittausjärjestelyn epäideali-

suudesta. Tuloksissa referointi MRP:ehen on yhdistetty kahden eri mittauksen tuloksista jotka esitettiin kappaleessa 3.3. Kuvista nähdään, että käytetyt mallit yhtyvät karkealla tasolla tuloksiin.

4.3 Ihmisen ja keinosuun suuntaavuuden eroja

Tarkastelussa on suoraan verrattu mittapisteeseen 1 referoituja siirtofunktioita mittapisteisiin 2-8 (kuva 5). Saatujen kuvaajien rinnalla on mallinnettu tilanne, jossa verrataan vastaavissa pisteissä vasteita referoituna samaan pisteeseen mutta eri suun avaumilla eli koolla. Varsinkin oikean puoleisesta kuvasta nähdään miten pisteissä havaittu ero on suhteellisen vakio merkittävästi suun sivulla. Mittauksista saadut tulokset varsinkin pisteissä 2-5 yhtyvät malliin, koska käyrät pientä n. 1dB:n hajontaa lukuun ottamatta hyvin yhtenevät. Mittapisteissä 6-8 ei samankaltaista yhteyttä ole löydettävissä. Tämä johtuu siitä, että vartalo vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Ilmeistä on, että käytetyn keinopään vartalo ei vastaa kovinkaan paljon keskimääräisen ihmisen vartaloa kyseisellä koehenkilöryhmällä. Malli ei myöskään anna tässä tapauksessa mielekästä tulosta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuten tuloksissa havaittiin on ihmisen ja keinopään suun suuntaavuudella merkittäviä eroja tarkasteltaessa laajaa taajuuskaistaa. Merkittäviä eroja näkyy yli 3kHz:n taajuuksilla. Nykyisien puhelimien taajuuskaistalla tällä ei ole merkitystä. Kuitenkin, kun tulevaisuuden laajempikaisetaiset puhelimet tulevat käyttöön viittaa tässä esitetty tarkastelu, että joko keinopään rakennetta pitäisi parantaa tai mittauksissa pitäisi käyttää jonkinlaista kompensointia. Näyttäisi siltä, että keinopään suun pienentäminen voisi olla yksi ratkaisu. Toisaalta varsinkin pään välittömässä läheisyydessä suuntaavuuden ero näyttäisi korjautuvan kiinteällä korjauskäyrällä riippumatta mittapisteestä.

LÄHTEET

1. ITU-T, Artificial Mouth. *Series P: Telephone Transmission Quality, Objective Measuring Apparatus*, P.51, International Telecommunication Union, 1996.
2. ITU-T, Head and Torso Simulator for Telephonometry. *Series P: Telephone Transmission Quality, Objective Measuring Apparatus*, P.58, International Telecommunication Union, 1996.
3. BARTLET, BRUCE A, Tonal Effects of Close Microphone Placement. *J. of the Audio Engineering Society* **29**(1981)10, 726-738.
4. BRIXEN EDDY B, Spectral Degradation of Speech Captured by Miniature Microphones Mounted on Persons' Head and Chest. *AES 100th Convention*, May 1996.
5. BRIXEN EDDY B, Near Field Registration of the Human Voice: Spectral Changes due to Positions. *AES 104th Convention*, May 1998.
6. DUNN H K & FARNSWORTH D W, Exploration of Pressure Field Around the Human Head During Speech. *J. of the Acoustical Society of America*, **10**(1939), 184-199.
7. FLANAGAN JAMES L, Analog Measurements of Sound Radiation from the Mouth. *J. of the Acoustical Society of America*, **32**(1960)12, 1613-1620.
8. HUOPANIEMI JYRI & KETTUNEN KAISA & RAHKONEN JUSSI, Measurements and Modeling Techniques for Directional Sound Radiation from the Mouth. *Proc. 1999 IEEE*

Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Oct. 1999, 183-186.

9. SUGIYAMA K & IRII H, Comparison of the Sound Pressure Radiation from a Prolate Spheroid and the Human Mouth. *Acustica*, **73**(1991), 271-276.
10. MORSE PHILIP M & INGARD UNO K, *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1968, 343-346.
11. BENDAT JULIUS S, *Random Data Analysis and Measurement Procedures*. 2nd edition, John Wiley & Sons, 1986, 565-576.