

# **MATKAPUHELINKAIUTTIMIEN TAAJUUSVASTEISTA JA SÄRÖKÄYT- TÄYTYMISESTÄ**

**Henri Penttinen, Antti Jylhä, Perttu Laukkanen ja Niko Lehtonen**

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu  
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos  
PL 13000, 00076 Aalto  
etunimi.sukunimi@aalto.fi

## **1 JOHDANTO**

Mobiililaitteet ovat kehittyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana matkapuhelimista monipuolisiksi multimedialaitteiksi. Erityisesti musiikillisten sovellusten ja pelien kehitys on ollut viime aikoina merkittävää. Nykyään mobiililaitteita käytetäänkin yhä enemmän toistamaan musiikkia ja erilaisiin sovelluksiin sisältyviä äänisisältöjä. Äänentoiston suhteen matkapuhelinten suurimpana haasteena on laitteiden koko, mikä rajoittaa kaiuttimelementtien suunnittelua. Äänenlaadun lisäksi tärkeitä suunnitteluparametreja ovat äänen säteilyteho, särön minimointi ja kestävyys sekä virrankulutus. Näiden välillä joudutaan usein tekemään kompromisseja [1]. Miniatyyrikaiuttimet säteilevät yleensä heikosti pieniä taajuuksia, mitä voidaan jossain määrin parantaa esim. kotelorakenteilla [2]. Lisäksi miniatyyrikaiuttimissa ilmenee usein huomattavia määriä säröä [3]. Suunnittelurajoitteet näkyvät myös moninaisina kaiutinsijoitteluina ja suojausratkaisuin. Puhelimen käyttäjän ja äänisisältöjen suunnittelijan kannalta kiinnostava kysymys onkin, miten hyvin laitteen kaiuttimet soveltuvat musiikin ja äänen toistoon ja kuunteluun.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää matkapuhelinkaiuttimien yleisiä äänentoistoon liittyviä ominaisuuksia. Erityisesti keskitytään analysoimaan puhelinten taajuusvasteita, särökäyttäytymistä sekä äänen säteilytasoa. On huomattava, että tässä käsitelystä ei keskitytä pelkkään kaiuttimelementtiin, kuten hifimittauksissa on tapana, vaan mitattavana on koko signaaliketju puhelimen mediasoittimesta kaiuttimeen asti. Mitattavaan ääniketjuun kuuluvat siis mahdolliset digitaaliset suodattimet, DA-muuntimet, vahvistin sekä kaiuttimelementit.

Aloitamme tarkastelun kuvaamalla lyhyesti käyttämämme analyysimenetelmät ja mitausjärjestelyt, jonka jälkeen esittelemme tuloksia puhelinten mitatuista taajuusvasteista, säteilytasosta, särökäyttäytymisestä ja aliasoitumisesta. Lopuksi teemme yhteenvedon matkapuhelinkaiuttimien nykytilasta.

## **2 ANALYYSIMENETELMÄT**

Kaiuttimien impulssi- ja taajuusvasteiden analyysiin on esitetty monia menetelmiä [4]. Eräs paljon käytetty tapa on käyttää sinimuotoista, logaritmista taajuuspyyhkäisyä, jonka avulla taajuusvasteen laskenta on suoraviivaista. Yhtenä logaritmisen pyyhkäisyn

etuna on, että sen avulla voidaan myös analysoida staattisia harmonisia särökomponentteja koko taajuusalueella [5]. Toinen tyypillinen tapa mitata harmonista säröä on käyttää pistetaajuuksia, jolloin särökomponentit erottuvat mitatussa spektrissä perustaajuuden kerrannaisina. Tämän tavan etuna on, että sen avulla on helppo laskea järjestelmän harmoninen kokonaissärö (*total harmonic distortion*, THD) kyseisellä taajuudella.

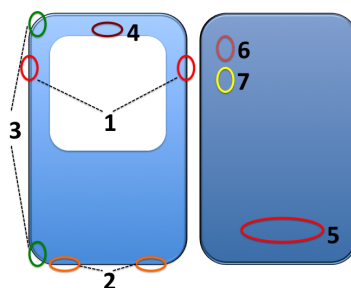
Pakarinen [6] on kehittänyt työkalun nimeltä Distortion Analysis Toolkit (DATK), joka on erityisesti suunniteltu epälineaarisen särön tarkasteluun. DATK:n avulla on mahdollista analysoida järjestelmien taajuusvasteita, harmonista säröä sekä pyyhkäisymittauksen että pistetaajuusmittauksen avulla, keskinäismodulaatiosäröä (*intermodulation distortion*, IMD), transientteja sekä aliasoitumista. DATK:n avulla käyttäjä voi luoda sopivan analyysisignaalin, johon on mahdollista sisällyttää esimerkiksi sekä pistetaajuuksia että logaritminen taajuuspyyhkäisy. Signaalin luomisen yhteydessä järjestelmä luo metadataa, jonka avulla nauhoitettujen signaalien analyysi on käyttäjälle yksinkertaista.

### 3 MITTAUSJÄRJESTELYT

Käytimme mittauksissa DATK -järjestelmällä muodostettua herätesignaalia, joka koostuu sekä sinimuotoisista pistetaajuuksista (1000 Hz ja 4000 Hz) että logaritmisesta taajuuspyyhkäisystä (100 - 20000 Hz). Herätesignaali toistettiin puhelinten omia mediasoittimia käyttäen kaiuttomassa huoneessa ja nauhoitettiin Brüel & Kjaer 4191 vapaa-kenttämikrofonin, B&K 2669 esivahvistimen, Nexus-mikrofonivahvistimen ja MOTU-äänikortin kautta. Nauhoitusohjelmana käytimme Audacityta. Nexuksen herkkyys oli asetettu vakioarvoon 316 mV tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi.

Kaikille laitteille teimme mittaukset yhden metrin etäisyydeltä 0 asteen kulmassa kolmella eri äänenvoimakkuudella (100 %, 50 % ja 10 %). Lisäksi suppeammalla puhelinjoukolla nauhoitimme mittaussignaalin 45, 90 ja 180 asteen kulmista puhelinta kääntämällä. Mittasimme puhelimet myös 65 \* 91 cm pöytälevyn päällä metrin etäisyydeltä.

Suuntaa antavan säteilytason mittasimme käyttämällä herätteenä valkoista kohinaa ja mittaamalla äänitasomittarilla (A-painotus) äänipainetason metrin etäisyydellä. Tässä tarkoituksena oli vertailla puhelinten toistovoimakkuutta. Toistotaso oli suurimmalla mahdollisella ja puhelimet oli käännetty äänenpainetason kannalta suotuisimpaan asentoon. Eroja puhelinmallien kaiuttimien asettelussa havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1: Testattujen puhelinten kaiuttimien paikat.

## 4 TULOKSET

Mittasimme yhteensä 16 puhelinta niin, että muutamasta mallista käytössä oli useita kappaleita. Lisäksi mittasimme kahdet lisäkaiuttimet, jotka tarkoitettu mobiili- ja multimedialaitteille. Taulukko 1 esittää mitatut matkapuhelinmallit sekä niiden taajuuskais-tan, A-painotetun SPL-arvon, THD-arvon ja mahdollisen äänekkyysskorostuman.

Taulukko 1: *Matkapuhelinten mitattuja ominaisuuksia. SPL on A-painotettu säteilyvoimakkuus yhdestä pisteestä, THD harmoninen kokonaissärö 50 % äänenvoimakkuudella neljästä ensimmäisestä harmonisesta laskettuna,  $f_{c1} - f_{c2}$  puhelimen päästökaista ja  $f_B$  ( $A_B$ ) mahdolliset merkitykselliset taajuuskorostumat.*

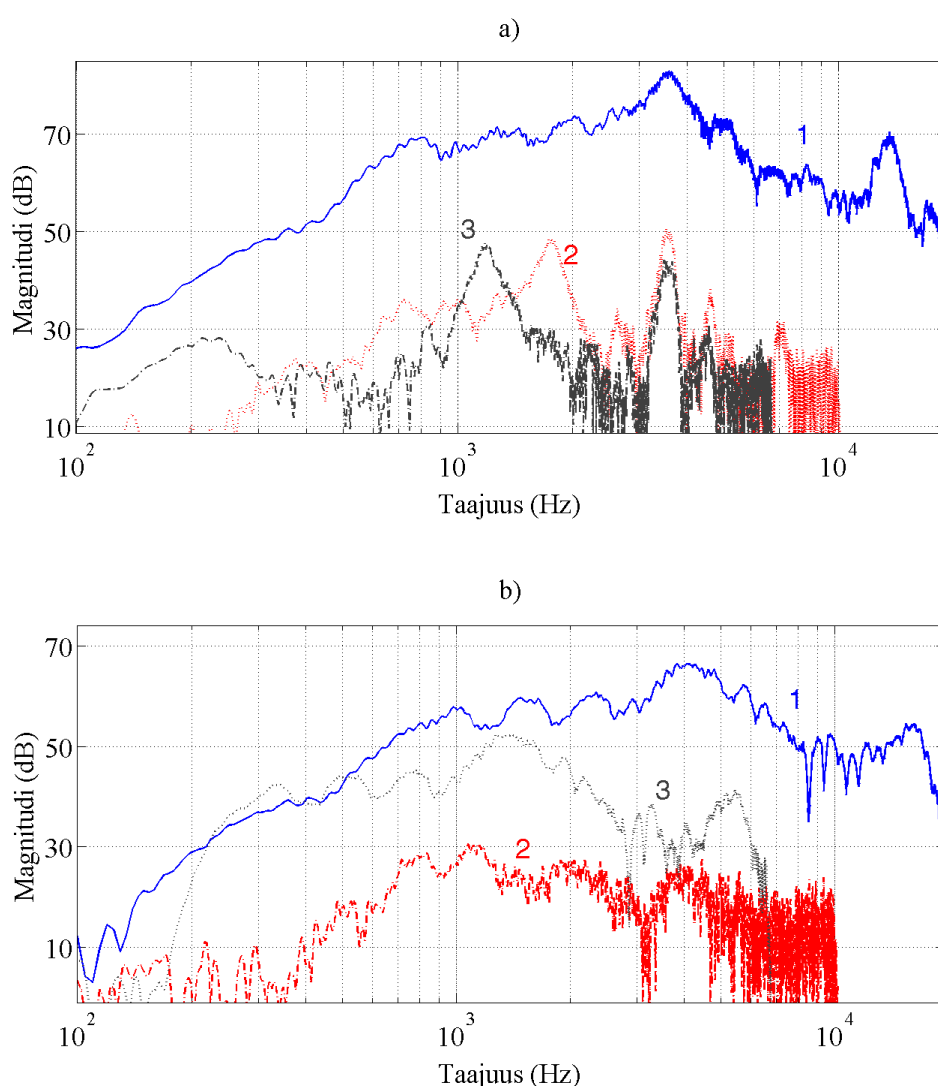
Puhelin	SPL [dBA]	THD @ [%]	$f_{c1} - f_{c2}$ [Hz]	$f_B$ ( $A_B$ ) [Hz]([dB])
Altec lisäkaiutin	86	0.3	250-15000	8200 (10)
Nokia lisäkaiutin	85	1.8	300-8500	-
Blackberry Pearl	79	2.2	700-9000	5000 (15)
Samsung SGH 400	78	1.5	750-18000	6500 (10), 10000 (8)
Nokia 5130	76	2.2	750-7000	4200 (6)
Nokia N8	74	2.1	900-7000	4500 (10)
Nokia N97 (1)	71	3.1	750-8000	3800 (9), 19000 (0)
Nokia N97 (2)	71	3.7	800-8000	3800 (9), 19000 (0)
Nokia N95 (1)	70	3.2	600-6000	3500 (15), 14000 (0)
Nokia N95 (2)	70	1.9	700-6000	3500 (10), 14000 (0)
Nokia N95 (3)	70	4.8	550-6000	3500 (15), 14000 (3)
Nokia 3120	67	33.2	1000-5500	3200 (6)
iPhone 3G	67	21.1	650-7000	4000 (10), 16000 (0)
iPod Touch	67	12.1	1050-2050	-
Nokia E71	64	9.4	700-12000	-
iPad	64	10.2	400-16000	3200 (10)
iPhone 4 (1)	64	6.1	650-10000	4200 (10), 14000 (3)
iPhone 4 (2)	N/A	8.4	600-10000	4200 (9), 14000 (3)

### 4.1 Säteilytaso

Taulukko 1 kuvaa suurinta saavutettavaa äänensäteilyä kullekin puhelimelle. Taulukon 1 puhelinmallit on järjestetty mitatun dBA säteilytason funktiona suurimmasta pienimpään. Mitattujen puhelinten keskiarvo on 70 dBA ja äänekkäin on Blackberry Pearl (79 dBA) ja hiljaisin iPhone4 (64 dBA). Mitatut lisäkaiuttimet ovat luonnollisesti äänekkäimmät ja n. 15 dBA tehokkaampia kuin puhelimet keskimäärin. Lisäksi Nokian N95- ja N97-malleilla ei näyttäisi olevan huomattavia yksilöllisiä eroja. SPL-mittaukset suoritettiin vain yhdestä pisteestä jolloin puhelinten suuntaavuutta ei huomioida.

## 4.2 Taajuusvasteiden tarkastelu

Kaiuttimien pieni koko näkyy selvästi mitatuissa vasteissa. Kuva 2 esittää a) Nokia N95 ja b) iPhone 3G puhelinten taajuusvasteet (yhtenäinen viiva). Puhelinten päästökaista on keskimäärin 700 Hz – 9000 Hz välissä (iPodTouchia ei ole huomioitu). Taulukko 1 esittää puhelinten päästökaistat -6 dB kulmataajuuksien avulla. Päästökaistan taso on määritelty 1000-3000 Hz keskiarvona. Levein taajuuskaista on Samsung SGH 400 puhelimella 750 - 18000 Hz. Tasaisin päästökaistan vaste on puhelimella Nokia E71. Heikkoiten pieniä taajuuksia toistavat iPodTouch jossa kulmataajuus on 1050 Hz. iPhone-puhelinten (iPhone 3-4) suhteessa leveä kaista selittyy heikolla säteilytasolla.



Kuva 2: Puhelinten a) Nokia N95 ja b) iPhone 3G taajuusvasteet (yhtenäinen viiva: 1) sekä kaksi ensimmäistä särökomponenttia (katkoviiva: 2 ja piste-katkoviiva: 3). Puhelinten SPL-tasoerot (kts. taulukko 1) näkyvät myös taajuusvasteissa.

Matkapuhelinten taajuusvasteet sisältävä lisäksi huomattavia poikkeamia. Osa poikkeamista liittyy epäilemättä heikkoon laatuun, mutta osa poikkeamista on systemaattisia

korostumia. Ensimmäinen systemaattinen korostuma sijaitsee 2-5 kHz alueella ja se voidaan tulkita suunnitelmalliseksi resonanssiksi jolla lisätään äänekkyyttä. Tämän korostuman vaikutus äänekkyyden lisäämiseen perustuu siihen, että kuulojärjestelmä on herkimmillään juuri 2-5 kHz alueella [7]. Kuva 2 esittää kuinka resonanssit sijoittuvat a) Nokia N95 ja b) iPhone 3G puhelimilla 3.5 kHz ja 4 kHz taajuuksille.

Muutamissa vasteissa ilmenee myös toinen systemaattinen korostuma 10-16 kHz alueella (Nokia N95 ja N97 sekä Samsung SGH 400 ja Applen puhelimet). Kuvan 2 puhelimille näiden korostumien keskitaajuudet ovat a) 14 kHz ja b) 16 kHz. Nämä korkeammalla taajuudella sijaitsevat resonanssit lisäävät äänenväriin kirkkautta ja aiheuttavat mahdollisesti systeemin rakenteellisista resonansseista.

Puhelimen pöydälle asettaminen voi teoreettisesti tehostaa äänensäteilyä 6 dB pienillä taajuuksilla. Puhelinten kaiutinasettelu vaikuttaa kuitenkin käytännössä merkittävästi korostuman syntyyn; esimerkiksi N95- ja iPhone-puhelimilla kaiuttimet ovat luonnostaan lähellä pöytälevyä, jolloin säteilytaso korostuu lähes 6 dB. Puhelimilla, joissa kaiuttimet on sijoitettu esimerkiksi etupaneeliin, merkittävää korostumaa ei synny.

Testatut kannettavat lisäkaiuttimet tuovat helposti 1-2 oktaavia lisää pienille taajuuksille, hieman puhelinmallista riippuen. Lisäkaiuttimien vaste on lisäksi huomattavasti tasaisempi päästökaistalla (3 dB sisällä) verrattuna matkapuhelinten omien kaiuttimien taajuusvasteisiin, joista löytyy jopa 15 dB vaihtelua päästökaistalla.

### 4.3 Puhelinten särökäyttäytymisestä

Puhelimien särökäyttäytymistä tutkittiin mittaamalla niiden THD arvot 1 kHz pistetaajuudella ja taajuusriippuvat särövasteet logaritmisesta pyyhkäisystä.

Taulukko 1 esittää mitattujen puhelimien THD arvot joiden keskiarvo on 7.1%. Hifikaiuttimien THD arvot ovat yleensä alle 0.5%. Tämä suuri keskiarvo selittyy osittain sillä, että mittauksessa tulee mukaan koko signaaliketju mediasoittimesta kaiuttimeen. Nokia 3120 puhelinta lukuun ottamatta Applen puhelimet särkevät eniten (keskiarvo 11.6%). Lasketut THD arvot ovat samaa luokkaa kuin mitä aiemmissa tutkimuksissa on mitattu [3].

Kuvassa 2 esitetään lineaaristen vasteiden (yhtenäinen viiva: 1) lisäksi toisen (katkoviiva: 2) ja kolmannen (piste-katkoviiva: 3) harmonisen särön magnitudi taajuuden funktiona. Särövasteiden taajuudet on skaalattu niin, että särökomponentit esitetään samalla taajuudella kuin lineaarivasteen komponentit. Toisin sanoen esim. 100 Hz lineaarivasteen toinen harmoninen esitetään kuvaajassa taajuudella 100 Hz, mutta sen oikea taajuus on 200 Hz. Kuvassa 2 a) Nokia N95 särövasteissa näkyy korostumat, jotka nousevat n. 20 dB päähän lineaarivasteesta 1200 Hz ja 1750 Hz taajuuksilla molemmissa särökomponenteissa. Kuvan 2 b) iPhone 3G särövasteessa näkyy korkea THD-arvo erittäin voimakkaana kolmannen harmonisen vasteena. Kolmas harmoninen on voimakkaampi kuin lineaarivaste 220 Hz - 520 Hz kaistalla.

Pyyhkäisymittausten aikana tehtiin kuulohavainnot signaalin aliasoitumisesta iPad-, iPhone4- ja Nokia N8 -malleille.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin 16 matkapuhelimen kaiuttimien äänentoisto-ominaisuuksia. Tämä on ensimmäinen julkaisu jossa aihetta ja mittaustuloksia käsitellään tässä laajuudessa. Tyypillisesti matkapuhelin säteilee 700-9000 Hz kaistalla ja n. 70 dBA tasolla. Muutamassa tapauksissa äänekkyyttä on lisätty korostamalla 3-5 kHz aluetta. Käytännön rajoitukset (tilavuus, kestävyys ja hinta) luovat haasteelliset olosuhteet suunnittelulle. Mitatuissa puhelimissa kaiutinsijoittelussa löytyykin laaja kirjo erilaisia ratkaisuja. Matkapuhelimille ja multimedialaitteille tarkoitetut kannettavat lisäkaiuttimet tuovat helposti 1-2 oktaavia lisää pienille taajuuksille, puhelinmallista riippuen. Lisäkaiuttimien vaste on lisäksi huomattavasti tasaisempi päästökaistalla (3 dB sisällä) kun taas matkapuhelinten taajuusvasteissa löytyy 15 dB tasoeroja. Matkapuhelimet säröyttävät signaalia (THD keskimäärin 7.1 %) huomattavasti enemmän kuin perinteiset hifi-kaiuttimet (THD < 0.5%).

## VIITTEET

- [1] BACKMAN J, Mobile phone audio: The shape of things to come, in *Audio Engineering Society Conference: 34th International Conference: New Trends in Audio for Mobile and Handheld Devices*, 2008, paper number 24.
- [2] BAI MINGSIAN R.; LIAO J, Acoustic analysis and design of miniature loudspeakers for mobile phones, *J. Audio Eng. Soc.*, **53**(2005) 11, 1061–1076.
- [3] BAI MINGSIAN R.; CHEN R L, Analysis and optimal design of miniature loudspeakers, in *Audio Engineering Society Convention 120*, 2006, paper number 6840.
- [4] STAN G B, EMBRECHTS J J, & ARCHAMBEAU D, Comparison of different impulse response measurement techniques, *J. Audio Eng. Soc.*, **50**(2002) 4, 249–262.
- [5] FARINA A, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, in *Audio Engineering Society Convention 108*, 2000, paper number 5093.
- [6] PAKARINEN J, Distortion analysis toolkit: a software tool for easy analysis of non-linear audio systems, *EURASIP J. Advances in Signal Processing*, **2010**(2010), 1, ISSN 1110-8657.
- [7] KARJALAINEN M, *Kommunikaatioakustiikka*, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1999.