

# **RYHMÄKERROIN ÄÄNILÄHDERYHMÄN SUUNTAAVUUDEN ARVIOINNISSA**

**Seppo Uosukainen<sup>1</sup>, Jukka Tanntari<sup>1</sup>, Heikki Isomoisio<sup>1</sup>, Esa Nousiainen<sup>2</sup>, Ville Veijanen<sup>2</sup>, Virpi Hankaniemi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> VTT  
PL 1000, 02044 VTT  
etunimi.sukunimi@vtt.fi

<sup>2</sup> Wärtsilä Finland Oy Power Plants  
PL 252, 65101 Vaasa  
etunimi.sukunimi@wartsila.com

## **Tiivistelmä**

Ryhmäkertoimen käsite äänilähderyhmän suuntaavuuden arvioimiseksi esitetään. Ryhmäkerroin ottaa huomioon ryhmän äänilähteiden lukumäärän ja niiden geometrisen sijoittelun sekä niiden keskinäisten amplitudi- ja vaihesuhteiden vaikutuksen äänensäteilyyn. MATLAB-ohjelmisto ryhmäkertoimen laskemiseksi on kehitetty ja validoitu yksinkertaisilla esimerkkiryhmillä, joiden suuntaavuus on analyttisesti tiedossa. Lasketut suuntaavuudet ovat erittäin tarkasti samoja analyttisten suuntaavuuslausekkeiden kanssa. Ohjelmistoa voidaan hyödyntää esimerkiksi säteilijäryhmien äänitehon minimoimiseksi ja interferenssiminimien aikaansaamiseksi halutuille vastaanottoalueille. Sovellusalueena on simuloitu voimaloiden pakomelun vähentämistä yksittäisten pakokanavien äänensäteilyn vaiheistuksella. Pakokanavien suhteellisilla vaihe-eroilla on merkittävä vaikutus äänensäteilyn suuntaavuusominaisuuksiin ja suhteelliset vaihe-erot voivat vaikuttaa myös kokonaisäänitehön voimakkaasti pienillä taajuuksilla.

## **1 JOHDANTO**

Äänilähteen suuntaavuusominaisuudet aiheuttavat erilaisen äänisäteilyn eri suuntiin. Monien lähteiden yhtä aikaa säteillessä lähderyhmän geometrinen sijoittelu sekä osalähteiden keskinäiset amplitudi- ja vaihe-erot tuottavat interferenssiefektin aiheuttaen kokonaisäteilyyn lisää suuntaavuutta. Tätä ryhmäominaisuutta kuvataan ryhmäkertoimella.

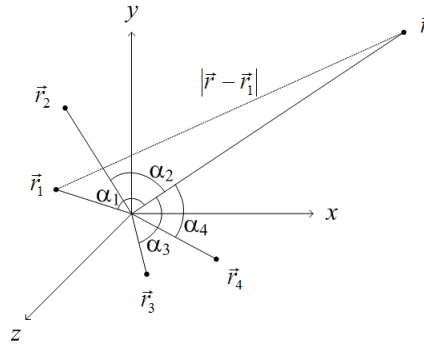
Wärtsilä Finland Oy Power Plantsin rahoittamassa hankkeessa on tutkittu äänilähderyhmän ryhmäkertoimen hyväksikäyttömahdollisuuksia äänensäteilyn minimoimiseksi.

## 2 RYHMÄKERROIN

Keskenään samanlaisten lähteiden (mahdollisia amplitudi- ja vaihe-eroja lukuunottamatta) tuottama kokonaisäänikenttä saadaan yksittäisen origoon sijoitetun äänilähteen tuottaman äänikentän  $p_0$  ja ryhmäkertoimen  $f_g$  tulona [1, 2]

$$p = p_0(\vec{r})f_g \quad f_g = \sum_{i=1}^N A_i e^{j(kr_i \cos \alpha_i + \varphi_i)}, \quad (1)$$

missä  $A_i$  ja  $\varphi_i$  ovat lähteen  $i$  suhteellinen amplitudi ja vaihe ja muut suureet nähdään kuvasta 1. Menetelmä toimii parhaiten lähderyhmän kaukokentässä. Ryhmäkertoimeen vaikuttavat näin ollen lähderyhmän geometrinen sijoittelu sekä osalähteiden lukumäärä ja niiden keskinäiset amplitudi- ja vaihe-erot.



Kuva 1: Ryhmäkertoimen muodostamis- ja käyttöperiaate [2];  $\vec{r}$  on kenttäpistevektori ja  $\vec{r}_1, \vec{r}_2 \dots$  ovat lähdepistevektorit.

Kuvan 1 mukaisesti lähteiden keskipistevektoreiden  $\vec{r}_i$  ja kenttäpistevektorin  $\vec{r}$  väliset kulmat  $\alpha_i$  tarvitaan ryhmäkertoimen määrittämiseksi. Ne saadaan lausekkeesta

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{\vec{r}_i \cdot \vec{r}}{|\vec{r}_i||\vec{r}|}\right). \quad (2)$$

Ryhmäkerroin on parhaiten esitettävissä pallokoordinaatiston avulla koordinaateilla  $(r, \theta, \phi)$ , missä kulma  $\theta$  on vektorin kulma  $z$ -akseliin nähden ja kulma  $\phi$  on vektorin  $xy$ -projektion kulma  $x$ -akseliin nähden. Radiaalikoordinaattia  $r$  ei tarvita ryhmäkertoimessa, ainoastaan vektorin  $\vec{r}$  kulmakoordinaatit.

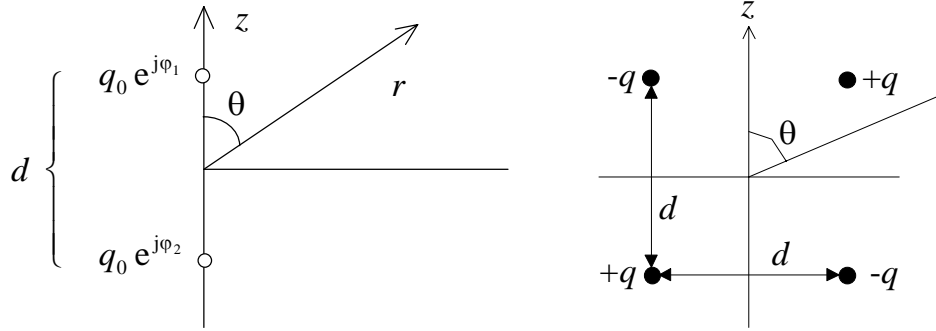
Keskinäisvaikutukset voivat vaikuttaa myös äänitehoon  $P$ , erityisesti pienillä taajuuksilla, jolloin lähderyhmän kokonaisääniteho ei ole yksittäisten äänilähteiden tehojen summa. Kokonaisääniteho voidaan laskea ryhmäkertoimen avulla lausekkeesta [2]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} |f_g|^2 \sin(\theta) d\phi d\theta, \quad (3)$$

missä  $P_0$  on origossa olevan äänenpaineen  $p_0$  tuottavan hypoteettisen referenssilähteen ääniteho.

### 3 VALIDOINTIESIMERKKEJÄ

Ensimmäisenä esimerkkinä tarkastellaan kahta  $z$ -akselilla keskinäisellä etäisyydellä  $d$  sijaitsevaa sama-amplitudista monopolia kuvan 2 (vasen) mukaisesti. Konfiguraatio on pyörähdyssymmetrinen  $z$ -akselin suhteen, joten tulokset eivät riipu kulmasta  $\phi$ . Toisena esimerkkinä tarkastellaan neljää kvadrupolilähteen muodostavaa monopolia kuvan 2 (oikea) mukaisesti. Tämä konfiguraatio ei ole pyörähdyssymmetrinen, joten tulokset riippuvat myös kulmasta  $\phi$ .



Kuva 2: Validointiesimerkit: (1) kaksi sama-amplitudista monopolia ja (2) neljä kvadrupolilähteen muodostavaa monopolia.

Ryhmäkertoimien analyyttiset lausekkeet ovat [2] (alaindeksit 1 ja 2 viittaavat esimerkeihin 1 ja 2)

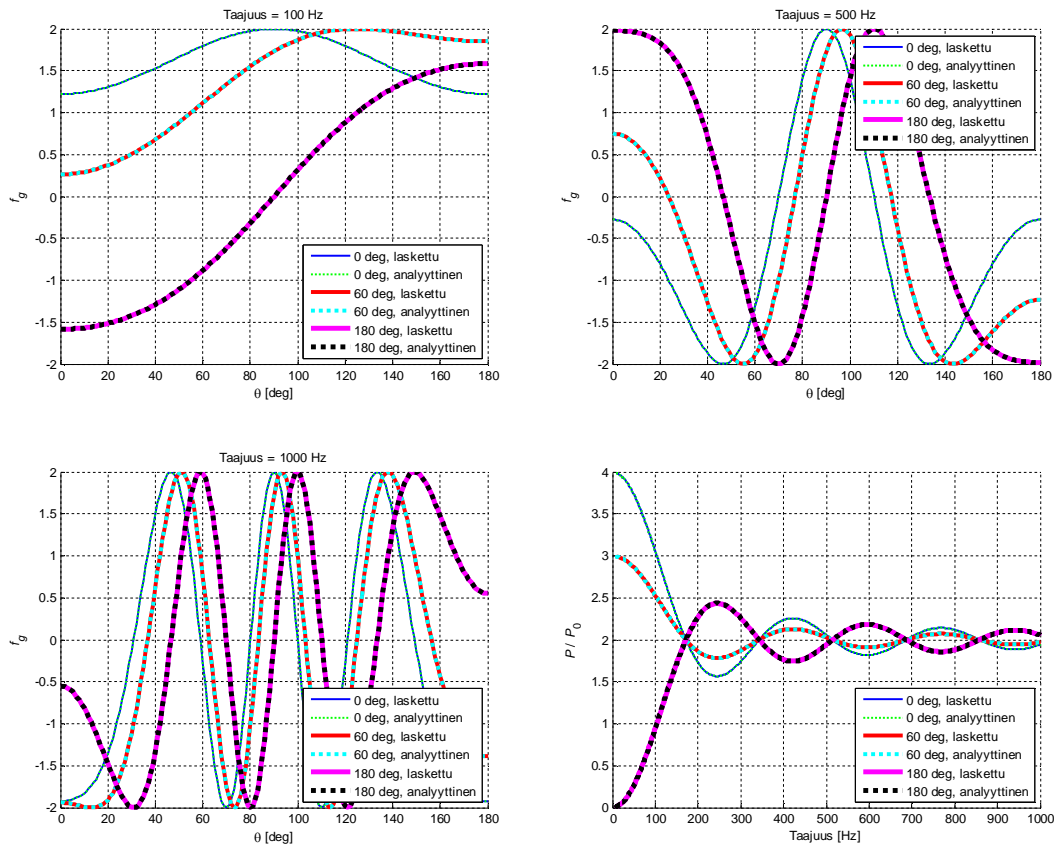
$$f_{g1} = 2e^{j\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}} \cos\left(\frac{kd \cos \theta + \Delta\varphi}{2}\right) \quad f_{g2} = -4 \sin\left(k \frac{d}{2} \cos \theta\right) \sin\left(k \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi\right), \quad (4)$$

missä  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

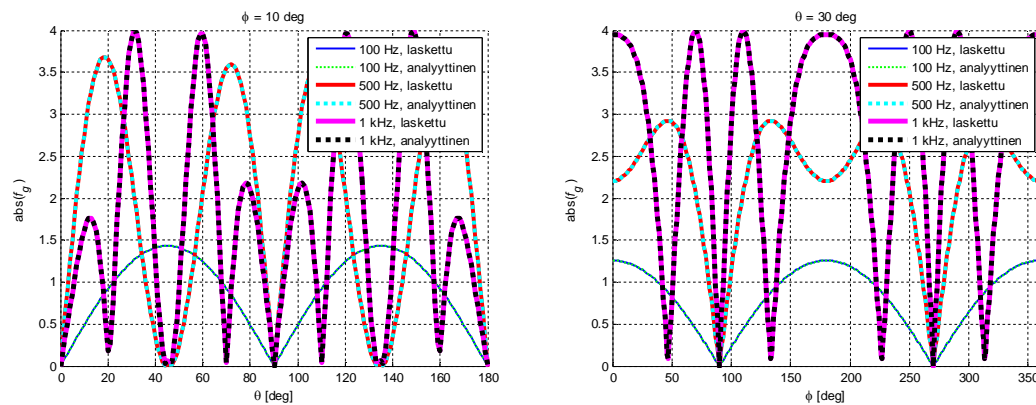
Esimerkin 1 äänitehon analyyttinen lauseke on [2]

$$\frac{P}{P_0} = 2 \left( 1 + \cos(\Delta\varphi) \frac{\sin(kd)}{kd} \right). \quad (5)$$

Kuvassa 3 on esitetty esimerkin 1 lasketut ja analyyttisen lausekkeen mukaiset ryhmäkertoimet (ilman vakiovaihetermiä) kolmella taajuudella ja suhteellinen ääniteho taajuusalueella 0–1000 Hz, kummatkin kolmella eri vaihe-erolla ja etäisyysparametrin arvolla  $d = 1$  m. Kuvassa 4 on esitetty esimerkin 2 lasketut ja analyyttisen lausekkeen mukaiset ryhmäkertoimet (itseisarvoina) kolmella taajuudella etäisyysparametrin arvolla  $d = 1$  m joihinkin suuntiin. Lasketut ja analyyttiset lausekkeiden mukaiset tulokset ovat käyrinä ai-  
van päällekkäin, joten nähdään, että kaavoihin (1), (2) ja (3) sekä kuvaan 1 pohjautuvan MATLAB-ohjelmiston tuottamat tulokset ovat analyyttisten tulosten kanssa äärimmäisen hyvin yhteensopivia.



Kuva 3: Esimerkin 1 ryhmäkertoimen lasketut ja analyttiset arvot taajuuksilla 100 Hz, 500 Hz ja 1 kHz kulman  $\theta$  funktioina, ja suhteelliset äänitehot taajuuden funktioina,  $d = 1$  m ja  $\Delta\varphi = 0, 60^\circ$  ja  $180^\circ$ .



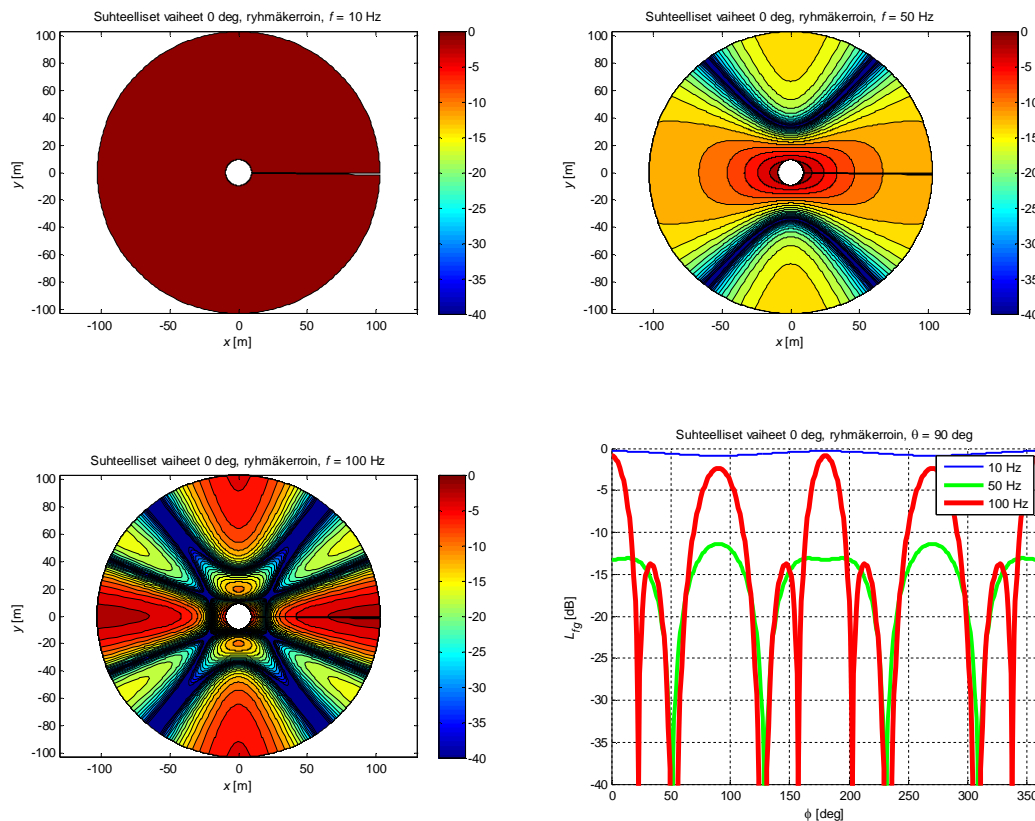
Kuva 4: Esimerkin 2 ryhmäkertoimen lasketut ja analyttiset arvot taajuuksilla 100 Hz, 500 Hz ja 1 kHz etäisyysparametrin arvolla  $d = 1$  m kulman  $\theta$  funktioina, kun  $\phi = 10^\circ$  ja kulman  $\phi$  funktioina, kun  $\theta = 30^\circ$ .

## 4 KUUDEN MOOTTORIN VOIMALAN PAKOMELU

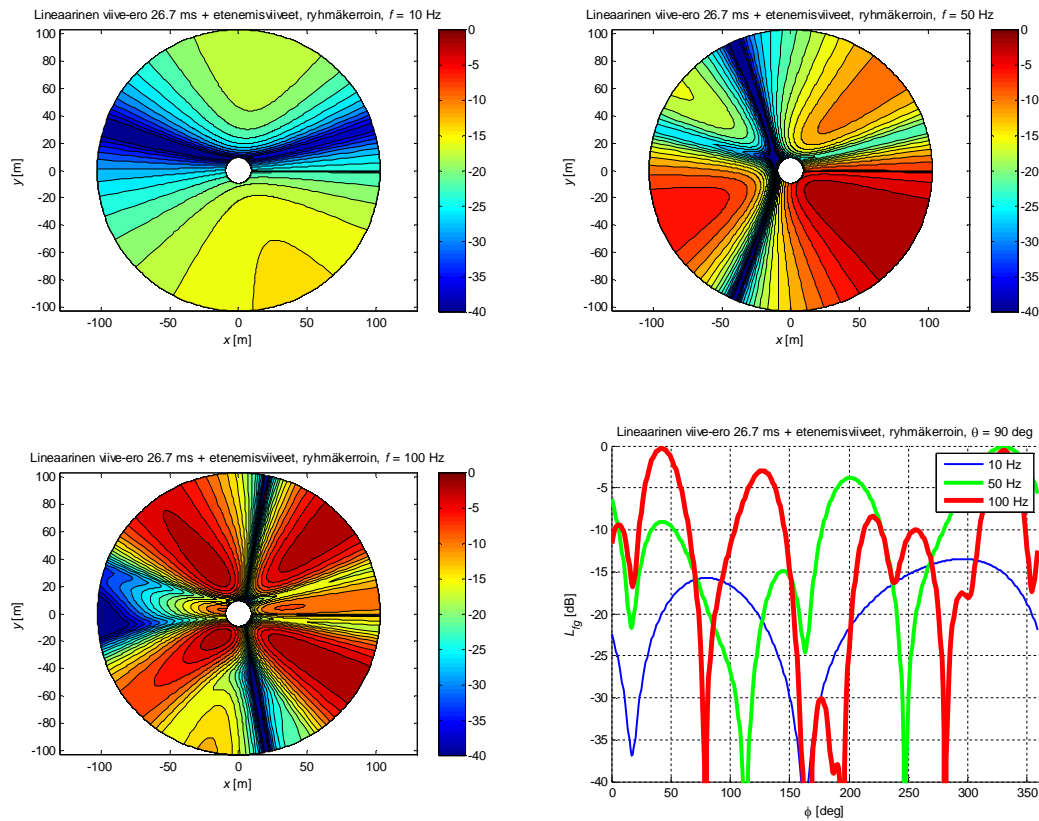
Sovellusesimerkkinä tarkastellaan kuuden moottorin voimalan pakomelua. Pakoputkien ulostulokonfiguraatio muodostaa 2·3 –matriisin. Putkien ulostulojen oletetaan tuottavan samanlaiset lähdevoimakkuudet ja ne ovat korkeudella 27.5 m maanpinnan yläpuolella keskipisteiden sijaitessa keskinäisillä etäisyyksillä 2.955 m toisistaan.

Kuvassa 5 on esitetty laskettu normalisoitu ryhmäkerroin  $f_g/N$  ( $N = 6$ ) dB-skaalassa projisoituna maanpinnalle etäisyysvälillä 10 – 100 m horisontaalisuunnissa taajuuksilla 10 Hz, 50 Hz ja 100 Hz suhteellisilla vaiheilla  $0^\circ$  ja kuvassa 6 peräkkäisten ulostulojen lineaarisella viive-erolla 26.7 ms ja putkien erilaisten pituuksien aiheuttamat eri suuruiset etenemisviiveet huomioonottaen. Ensin mainittu lineaarinen viive-ero on 1/6 periodi taajuudella 6.25 Hz (nelitahtisen moottorin yksittäisen sylinterin sytytystaajuus pyörintänopeudella 750 rpm), ja putkien erilaiset pituudet ovat  $L_0$ ,  $L_0 + 8.374$  m ja  $L_0 + 17.57$  m, missä  $L_0$  on lyhyimpien putkien pituus. Lasketut suhteelliset äänitehot  $P/(NP_0)$  dB-skaalassa taajuuden funktiona taajuusvälillä 10 – 200 Hz on esitetty kuvassa 7.

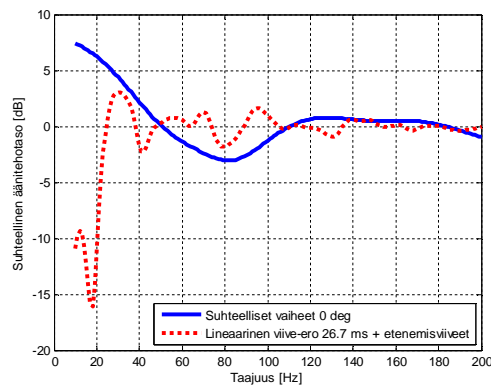
Nähdään, että pakoputkiryhmän suhteellisilla vaihe-eroilla on merkittävä vaikutus äänensäteilyn suuntaavuusominaisuuksiin. Suhteelliset vaihe-erot voivat vaikuttaa myös kokonaisäänitehoon voimakkaasti pienillä taajuuksilla.



Kuva 5: Normalisoitu ryhmäkerroin projisoituna maanpinnalle horisontaalisuunnissa dB-skaalassa taajuuksilla 10 Hz, 50 Hz ja 100 Hz suhteellisilla vaiheilla  $0^\circ$ .



Kuva 6: Normalisoitu ryhmäkerroin projisoituna maanpinnalle horisontaalisuunnissa dB-skaalassa taajuuksilla 10 Hz, 50 Hz ja 100 Hz peräkkäisten ulostulojen lineaarisella viive-erolla 26.7 ms ja putkien erilaisten pituuksien aiheuttamat eri suuruiset etenemisviiveet huomioonottaen.



Kuva 7: Esitettyjen tapausten suhteelliset kokonaisäänitehotasot taajuuden funktiona.

## VIITTEET

- [1] Stutzman W L, Thiele G A, Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.
- [2] Uosukainen S, Akustinen kenttäteoria, Aalto-yliopisto, Espoo, 2012.