

SIIRTOMATRIISIN JA ÄÄNENERISTÄVYYDEN MITTAUS

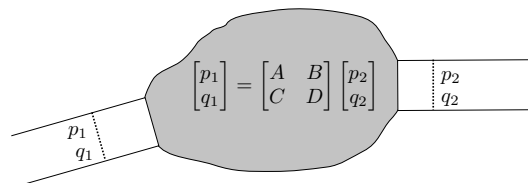
Heikki Isomoiso¹, Jukka Tanttari¹, Esa Nousiainen², Ville Veijanen²

¹Valtion teknillinen tutkimuskeskus
PL 1300, 33101 Tampere
etunimi.sukunimi @ vtt.fi

²Wärtsilä Finland Oy
PL 252, 65101 Vaasa
etunimi.sukunimi @ warsila.com

1 JOHDANTO

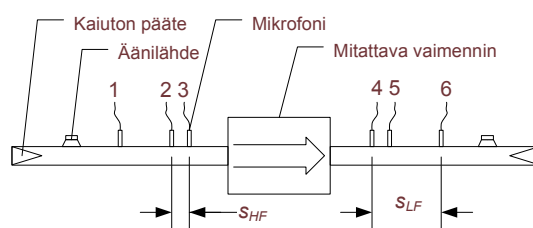
Putkiakustiikassa siirtomatriisi määrittelee yhteyden äänenpaineen ja tilavuusnopeuden välille kahdessa siirtolinjan pisteessä (kuva 1). Kaksiporteista koostuvan siirtolinjan akustinen toiminta on täysin tunnettu, kun jokaisen kaksiportin siirtomatriisi tunnetaan. Siirtomatriisia voidaan täten käyttää esimerkiksi pakokanavan akustiikan suunnittelun apuvälineenä. Kunhan lähteen ominaisuudet, impedanssi ja lähdevoimakkuus, tunnetaan, voidaan ennustaa kanavan ääniteho. Käytännössä varsinkin monimutkaisten järjestelmien, kuten äänenvaimentimien, siirtomatriisia ei kuitenkaan usein tunneta.



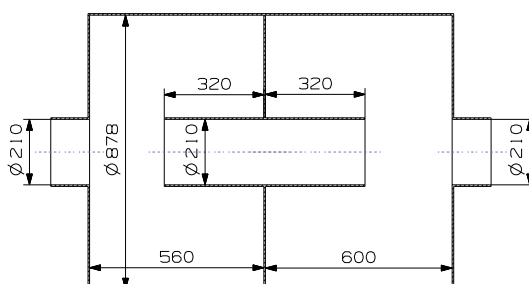
Kuva 1: Kaksiportti (p = äänenpaine, q = tilavuusnopeus)

To ja Doige lienevät ensimmäisinä julkaisseet digitaalista signaalinkäsittelyä hyödyntävän akustisen siirtomatriisin mittaamenetelmän [1, 2]. Myöhemmin Munjal ja Doige ovat julkaisseet kahden lähdesijainnin menetelmän [3], jossa kohde mitataan lähteen ollessa vuoroin sekä ylä- että alavirran puolella. Lähteen sijainnin muuttaminen tuo tarvittavat lisäyhtälöt, joista neljä kompleksista siirtomatriisin alkiota voidaan ratkaista. Siirtomatriisi voidaan mitata myös sirontamatriisin kautta Åbomin esittämällä tavalla [4, 5]. Siirtomatriisi saadaan sirontamatriisista matemaattisen muunnoksen avulla.

Ääneneristävyys kuvaa putkiakustiikassa siirtolinjan osan läpäisseen ja osaan kohdistuvan tehon suhdetta tilanteessa, jossa läpäissyt teho ei enää heijastu takaisin. Toisin kuin lisäsvaimennus tai äänenpainetasen alenema, ääneneristävyys on siirtolinjan osan oma ominaisuus, joka ei riipu ympäröivän siirtolinjan ominaisuuksista. Tästä syystä ääneneristävyys on hyödyllinen mittari, kun äänenvaimentimia halutaan vertailla keskenään. Myös tuotekehitysprosessissa mallien vertailu todelliseen vaimentimeen on mielekkäämpää ääneneristävyuden kuin muiden edellä mainittujen suureiden avulla.



Kuva 2: Siirtomatriisin mittausta (s_{HF} = suuritaajuusmikrofonien välimatka, s_{LF} = pienitaajuusmikrofonien välimatka)



Kuva 3: Kaksoiskammiovaimennin

2 SIIRTOMATRIISI- JA ÄÄNENERISTÄVYYSMITTAUKSET

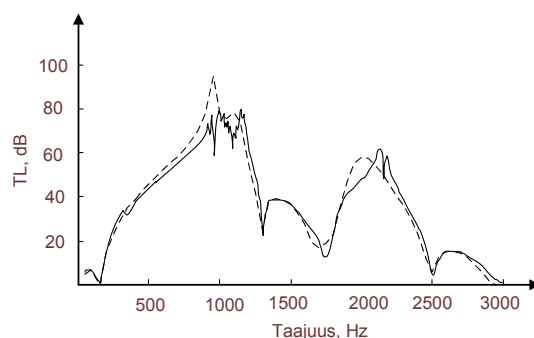
Valtion teknillinen tutkimuskeskus on hankkinut siirtomatriisin ja ääneneristävyden mittaamiseksi SIDLAB Measurement -ohjelman [6], joka ottaa syötteenä kuusi kompleksista äänenpainetaajuusvaste-estimaattia, joista se laskee siirtomatriisin ja ääneneristävyden. Mikrofonien vaihevasteen tarkkuus on tärkeää, ja SIDLAB Measurementissa onkin mahdollisuus kompensoida vaihevirheet. Taajuusvasteen laskennassa referenssi-signaalina voidaan käyttää kaiuttimeen syötettävää herätesignaalia, joka voi olla esimerkiksi sini-, uikku- tai kohinasignaali. SIDLABin siirtomatriisimittausta havainnollistaa kuva 2. Ääneneristävyys voidaan laskea siirtomatriisista yhtälöllä

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} |A + Z^{-1}B + ZC + D| \right) \quad (1)$$

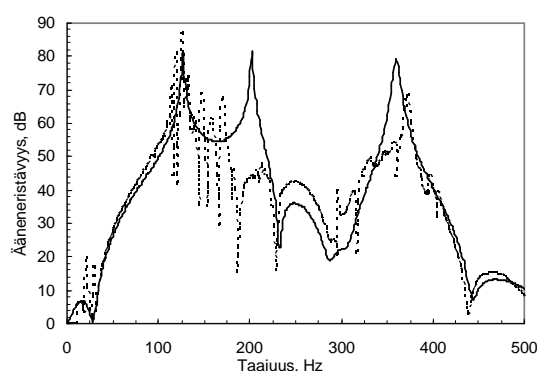
jossa $Z = \rho c/S$ on putken impedanssi, ρ väliaineen tiheys, c äänen nopeus ja S putken poikkipinta-ala [7].

2.1 Kaksoiskammion ääneneristävyys

Kuvassa 3 on esitetty kaksoiskammiovaimennin, jonka ääneneristävyys on mitattu SIDLAB Measurement -ohjelmaa käyttäen. Mitattu ääneneristävyys on esitetty kuvassa 5. Tao ja Seybert ovat mitanneet samalla menetelmällä vaimentimen, joka on mitoitetaan 1/6-osa kuvan 3 vaimentimesta. Tao ja Seybert myös laskivat vaimentimensa ääneneristävyden reunaelementtimenetelmällä [8]. Heidän tuloksensa on esitetty kuvassa 4. Kuvan 5 mitatun ääneneristävyden epämääräinen käytös taajuusalueella 100...200 Hz saattaa johtua siitä, että hyvin suurta ääneneristävyyttä on kyseisellä menetelmällä vaikea mitata, koska vaimennin heikentää mittaussignaalia liikaa. Vaimentimen seinä-



Kuva 4: Taon ja Seybertin kaksoiskammion ääneneristävyys (katkoviiva = reunaelementtimenetelmä, yhtenäinen viiva = mittaus) [8]



Kuva 5: Kuvan 3 kaksoiskammion ääneneristävyys (katkoviiva = mittaus, yhtenäinen viiva = elementtimenetelmä)

mät ovat melko ohuet, joten myös rakenteen resonanssivärähtelyt saattavat aiheuttaa havaitun poikkeaman. Lisäksi lähettävällä puolella vaimentimen aiheuttamat heijastukset synnyttävät solmukohtia tietyillä taajuuksilla jokaisen lähetyspuolen mikrofonin kohdalle.

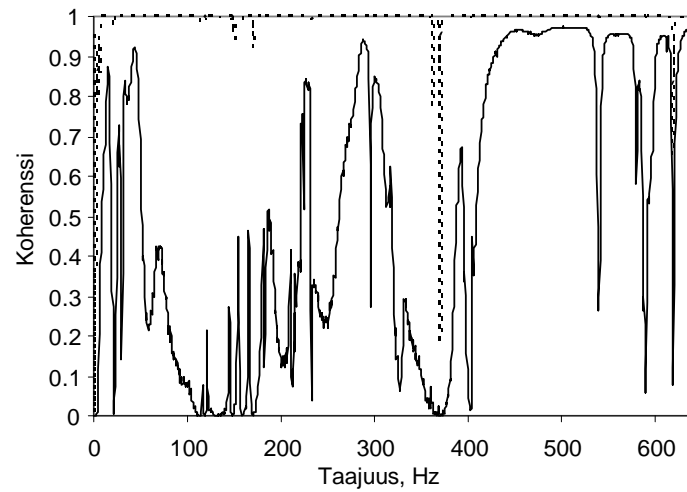
Taajuusvasteen mittauksessa heräte- ja vastesignaalin välisellä koherenssilla voidaan arvioida mittauksen laatua. Kuvassa 6 on esitetty vastaanottavan puolen mikrofonin ja herätesignaalin välinen koherenssi kaksoiskammiota mitattaessa kohina- ja uikkusignaaleilla. Vaikka uikkuherätteellä koherenssi on huomattavasti parempi kuin kohinaherätteellä, kuitenkin merkittävää yhteyttä ääneneristävyystulokseen ei ole havaittavissa kuvassa 7.

2.2 Putken siirtomatriisi ja ääneneristävyys

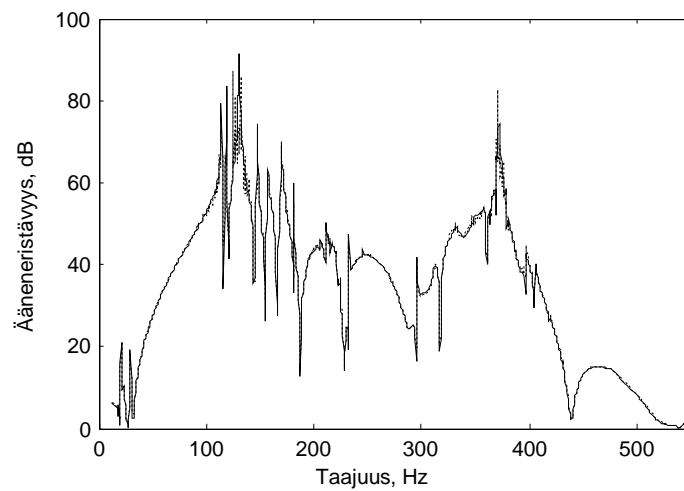
Häviöttömän putken siirtomatriisi on

$$T = \begin{bmatrix} \cos(kl) & iZ \sin(kl) \\ iZ^{-1} \sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \quad (2)$$

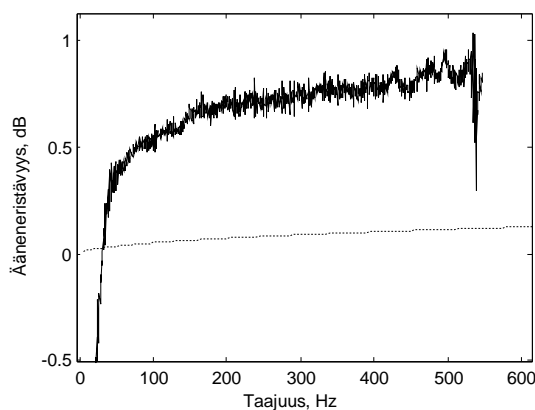
jossa k on aaltoluku ja l on putken pituus. Soveltamalla yhtälöä (1) nähdään, että ääneneristävyys on nolla. Todellisessa putkessa esiintyy kuitenkin viskositeetista ja lämmönjohtavuudesta aiheutuvia häviöitä. SIDLAB Simulation mallintaa häviöt Allamin



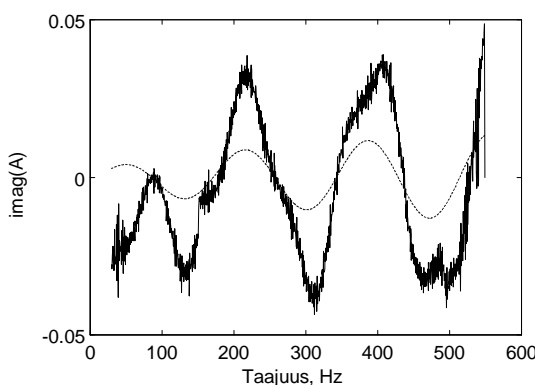
Kuva 6: Koherenssi erään vastaanottavan puolen mikrofonin ja herätesignaalin välillä (katkoviiva = uikkueräte, yhtenäinen = kohinaheräte)



Kuva 7: Kaksoiskammion mitattu ääneneristävyys (katkoviiva = kohinaheräte, yhtenäinen viiva = uikkueräte)



Kuva 8: Suoran putken ääneneristävyys (yhtenäinen viiva = mitattu, katkoviiva = SIDLAB)



Kuva 9: Suoran putken siirtomatriisin elementin A imaginaariosa (yhtenäinen viiva = mitattu, katkoviiva = SIDLAB)

ja Åbomin esittämällä tavalla [9]. Kuvassa 8 on esitetty SIDLAB Simulationin [10] ennustama teoreettinen ääneneristävyys ja kahden metrin mittaisen putken mitattu ääneneristävyys. Pienillä taajuuksilla putken häviöt ovat merkittäviä vähähäviöistä järjestelmää mitattaessa. Kyseisessä mittauksessa herätteen taajuuskaista on noin 30...550 Hz. Mitatun siirtomatriisin elementin A imaginaariosa on esitetty kuvassa 9.

3 YHTEENVETO

Siirtomatriisin ja ääneneristävyiden mittauksen SIDLAB Measurement -ohjelmalla on todettu antavan teorian mukainen suoran putken siirtomatriisi ja ääneneristävyys. Kaksoiskammiovaimentimesta mittausjärjestelmällä pystyttiin luotettavasti mittaamaan enimmillään noin 40...50 dB ääneneristävyys. Tätä suuremmilla ääneneristävyksillä mitaustulos poikkeaa elementtimenetelmällä lasketusta ennusteesta mahdollisesti rakenteen värähtelyjen, vastaanottopuolen heikon signaalin sekä äänenvaimentimen aiheuttamien heijastusten vuoksi. Tulevaisuudessa mikrofonien vaihevasteen korjausta on syytä parantaa ja pyrkiä eliminoimaan vaimentimen värähtelyjen sekä heijastusten vaikutusta. Maksimijonomenetelmän soveltuvuus taajuusvasteen, siirtomatriisin ja ääneneristävyiden mittaamiseen on myös syytä selvittää.

VIITTEET

- [1] TO C & DOIGE A, A transient testing technique for the determination of matrix parameters of acoustic systems, I: Theory and principles, *Journal of Sound and Vibration*, **62**(1979) 2, 207 – 222, ISSN 0022-460X.
- [2] TO C & DOIGE A, A transient testing technique for the determination of matrix parameters of acoustic systems, II: Experimental procedures and results, *Journal of Sound and Vibration*, **62**(1979) 2, 223 – 233, ISSN 0022-460X.
- [3] MUNJAL M L & DOIGE A G, Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element, *Journal of Sound and Vibration*, **141**(1990) 2, 323–333.
- [4] ÅBOM M, A note on the experimental determination of acoustical two-port matrices, *Journal of Sound and Vibration*, **155**(1992) 1, 185–188.
- [5] ÅBOM M, Measurements of the scattering-matrix of acoustical two-ports, *Noise Control Engineering Journal*, **1**(1990), 537–540.
- [6] SIDLAB Measurement, <http://www.sidlab.se/SIDLABMeasurement.htm>, [Haettu 6.4.2009].
- [7] MUNJAL M, *Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design*, Wiley-Interscience, 1987.
- [8] TAO Z & SEYBERT A F, A review of current techniques for measuring muffler transmission loss, in *Noise & Vibration Conference and Exhibition*, number 2003-01-1653 in SAE Technical Paper Series, SAE International, Traverse City, Michigan, 2003.
- [9] ALLAM S & ÅBOM M, Investigation of damping and radiation using full plane wave decomposition in ducts, *Journal of Sound and Vibration*, **292**(2006) 3-5, 519 – 534, ISSN 0022-460X.
- [10] SIDLAB Simulation, <http://sidlab.se/SIDLABSimulation.htm>, [Haettu 12.4.2009].