

UUSIA ÄÄNIERISTYKSEN ANALYYSIMENETELMIÄ

Tapio Lahti

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 24
No 1 1991, ss. 64 - 74

TIIVISTELMÄ: Kirjoituksessa esitellään uusia laskenta- ja mittausmenetelmiä, joilla voidaan tarkastella äänieristystä monipuolisemmin kuin vakiomittauksilla. Mittausmenetelmät perustuvat äänen intensiteettitekniikan ja nopean Fourier-muunnoksen (FFT) käyttöön, ja 2-ulotteista muunnosta käytetään myös simulointilaskelmissa. Menetelmiä ovat tulevan ja läpimenneen intensiteetin suora mittaaminen, rakenteen ilmapölyjen akustinen moodianalyysi sekä äänikenttien rekonstruointi akustisen holografian avulla. Laskentaesimerkkeinä on pintalähteen säteilemän äänikentän ja tulevan äänikentän herättämän pinnan värähtelyn simulointeja. Mittausmenetelmiä sovellettiin 2-lasisen ikkunan eristyksen analyysiin.

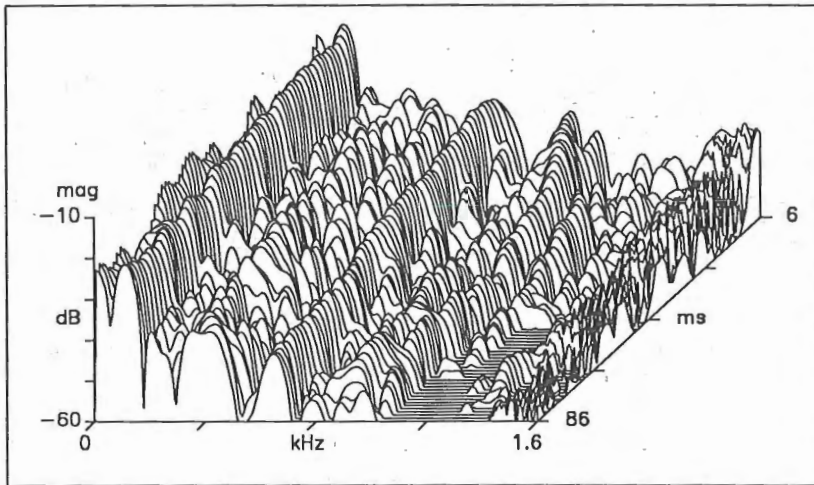
JOHDANTO

Useat äänieristyksen arviointiin ja analyysiin käytetyt menetelmät ovat yksinkertaisia kokemusperäisiä muistisääntöjä, jotka pohjautuvat standardisoituihin eristysmittauksiin. Näiden tulokset ovat toistettavia, mutta olosuhteet eivät yleensä vastaa todellisia asennus- tai käyttötilanteita. Vakiomittauksin saadaan rakenteet paremmuusjärjestykseen tai selville, onko toteutus hyväksyttävä. Sen sijaan ne eivät riitä syy-seuraussuhteiden selvittämiseen, joita voitaisiin tarvita esimerkiksi tuotekehityksessä.

Äänieristyksen analyttinen tarkastelu vaatii raskasta akustista teoriaa. Mittaus- ja arviointimahdollisuuksia ovat toisaalta tuntuvasti edistäneet kaksi viime vuosien kehityspiirrettä. Tietokoneella voidaan simuloida tapauksia, jotka eivät ratkea paperilla. Nopeaa Fourier-muunnosta (FFT) ja intensiteettitekniikkaa käyttävät menetelmät eivät yleensä edellytä standardimittauksissa käytettyjä akustisia erityisolosuhteita, jotka voidaan saavuttaa vain laboratoriossa. Menetelmät tarjoavat monia uusia näkökulmia rakennusakustiikan tavallisiin ongelmiin.

Tässä artikkelissa kuvataan lyhyesti joukkoa uusia laskenta- ja mittausmenetelmiä, joilla voidaan tarkastella äänieristystapahtumaa verrattomasti monipuolisemmin kuin vakiomittauksilla. Esitys on tiivis kooste viitteen [1] äänieristystä koskevista osista.

Laskentaesimerkkeinä on yleisen pintalähteen värähtelymuotojen säteilemän äänikentän ja tulevan äänikentän herättämän värähtelymuotojakautuman simulointeja, joissa käytetään 2-ulotteista Fourier-muunnosta. Mittausmenetelmiä sovellettiin yhden koe-kappaleen eristyksen analyysiin; kohde oli tavallinen 2-lasinen ikkuna. Avain monipuolisiin analyysimahdollisuuksiin on kompleksisen taajuusvastefunktion käyttö mittaustietojen



Kuva 1. Tutkitun ikkunan 2. lasin keskipisteen säteilemän painevasteen kumulatiivinen spektri eli 3-ulotteinen maisemaesitys ikkunan säteilypaineen impulssi- ja taajuusvasteesta tulevan aallon paineelle.

hankintavaiheessa. Kuvassa 1 nähdään esimerkki liukuvan Fourier-muunnoksen soveltamisesta ikkunan yhden pisteen taajuusvasteeseen. Kuva visualisoi tehokkaasti eräitä eristävyyyteen vaikuttavia ominaisuuksia, jotka eivät tule näkyviin vakiomittauksissa.

Muita analyyseissä sovellettuja menetelmiä olivat mm.

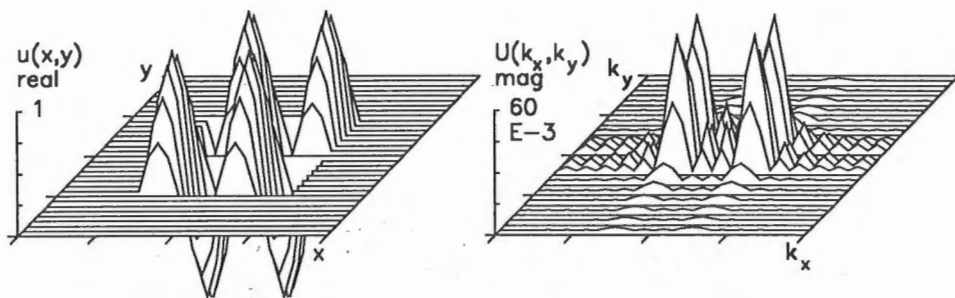
- rakenteen läpäisemän äänitehon mittaaminen intensiteettimenetelmällä [2],
- uusi menetelmä tulevan äänitehon suoraan mittaamiseen ilman mitään etukäteisoletuksia tulevan äänikentän muodosta [1],
- ilmaontelon sisältävän rakenteen akustinen moodianalyysi [3] ja
- säteilyä äänikentän analyysi akustista holografiaa [4] käyttäen, jolla saadaan konstruoiduksi intensiteetin virtauskarttoja.

TEORIAA

Tarkasteltaessa kiinteiden värähtelevien kappaleiden ja äänikentän yhteistä käyttäytymistä — rakenteiden säteilyä, niiden vastetta äänelle ja äänen kulkua niiden läpi — voidaan säteilyä pitää perusilmionä. Rakenteiden vaste tulevalle äänikentälle, mukaanlukien niiden äänen absorptio, on käänteinen eli resiprookkinen ongelma. Ja läpäisy eli eristys on näiden kahden yhdistelmä.

Äänisäteily

Säteillevien pintojen värähtelymuodot ja niiden säteilemät painekentät ovat akustisen teorian pääaiheita. Niiden analyysillä on yli kahden vuosisadan perinteet, ja tunnettu teoria on kuvattu kattavasti oppikirjoissa [5–7]. Keskeiset teoria-artikkelit, mm. [8–13], ovat



Kuva 2. Esimerkki suorakulmisen tasolähteen (4,2) -värähtelymuodon 2-ulotteisesta paikka-aaltoluku Fourier-muunnoksesta.

pääosin muutaman vuosikymmenen ikäisiä. Uudemmassa tutkimuksessa painotetaan laskenta-, tietokone- ja mittaussovelluksia, esim. [14–16].

Säteilyn analyttinen mallintaminen ratkaisuksi asti on hankalaa. Pintojen äänisäteilyn analysoimiseksi on yleensä tarkasteltava pinnan taivutusaaltojen värähtelymuotoja. Niiden nopeusjakautumat määräävät äänisäteilyn ominaisuudet. Esimerkiksi äärettömällä jäykällä tasolla olevan suorakulmisen levyn yhden muodon (l,m) säteilemä kompleksinen paine äärettömään puoliavaruuteen saadaan yhtälöstä

$$p_{lm}(r) = \frac{j\omega\rho}{2\pi} U_{lm} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \psi_{lm}(x,y) \frac{1}{R} e^{-jkR} dx dy \quad (1)$$

missä L_x ja L_y ovat levyn mitat, U_{lm} on värähtelymuodon moodinopeus (kompleksinen osoitin) ja $\psi_{lm}(x,y)$ muotofunktio. Integraali ratkeaa vain likimääräisesti kaukokentässä.

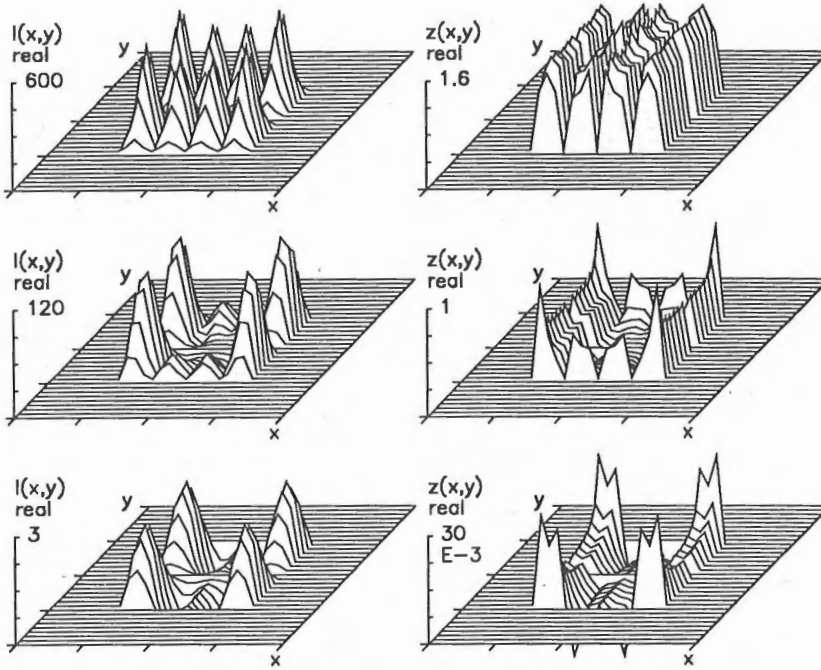
Äänieristyksen tapauksessa lopullinen kiinnostava suure ei ole kompleksinen paine p vaan säteilty ääniteho. Intensiteetin $I = pu^*$ välityksellä saadaan kokonaisääniteho, $\Pi_\sigma = \int_S I dS$, kaikkialla, niin kauko- ja lähikentässä kuin lähteen pinnallakin:

$$\Pi_\sigma = \int_S \text{Re}\{p(\mathbf{R}) u^*(\mathbf{R})\} dS \quad (2)$$

säteilty hiukkásnopeus u saadaan yhtälöä (1) vastaavalla integraalilla.

Analyttisen tarkastelun katkettua päästään vaikeammissa tapauksissa eteenpäin numeerisin keinoin tietokoneella. Lähtötieto värähtelyn nopeudesta voi edelleen olla analyttistä, mutta yhtä hyvin myös peräisin muista numeerisista menetelmistä, kuten FEM-laskennasta, tai jopa suoraan (kompleksisen nopeusjakautuman) mittauksista.

Yhtälön (1) muotoiset säteilyintegraalit ovat yleiseltä muodoltaan konvoluutioita. Mielivaltaisen konvoluutiointegraalin laskemiseen käytetään Fourier-muunnosta. Säteilyn tapauksessa sillä saatava hyöty konkretisoituu kahdella tavalla. Muunnoksen yleinen etu on, että integraali saadaan muutetuksi yksinkertaiseksi kertolaskuksi. Säteilyn tapauksessa muunnos tuottaa sarjan tasoaaltoja, ja tasoaaltojen säteilyimpedanssi (muunnos pinnan



Kuva 3. Kuvan 2 levyn (4,2) -värähtelymuodon säteilemän äänikentän intensiteetti ja säteilyimpedanssi kolmella taajuudella. Suure: (vasen) intensiteetti, (oikea) impedanssi; taajuus: (ylä) 1000, (keski) 315, (ala) 100 Hz.

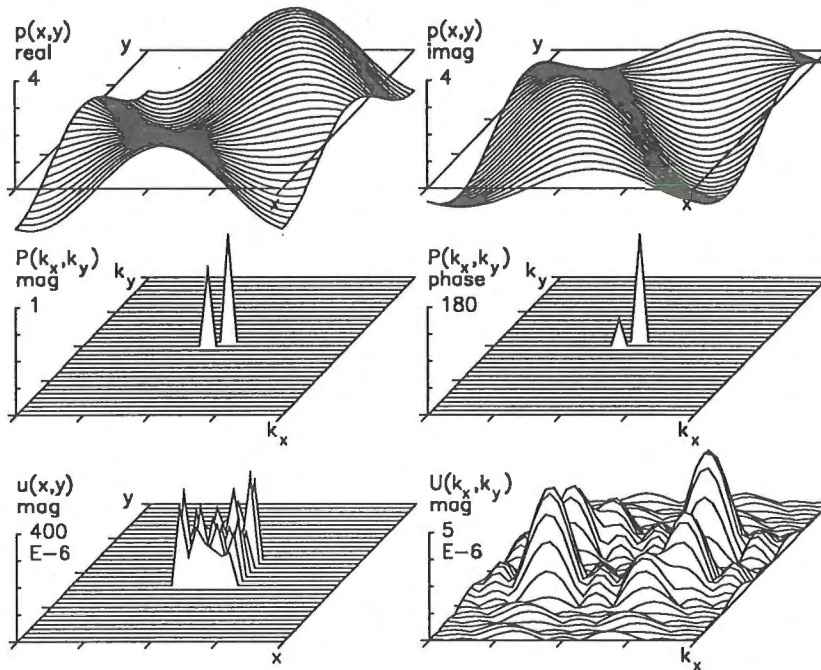
nopeudesta paineeksi) tunnetaan analyttisesti. Kuvassa 2 on esimerkki värähtelymuodon Fourier-muunnoksesta.

Säteilevän pinnan taivutusaalto, joka etenee aaltoluvulla k_x , säteilee tasoallon lausekkeen $\cos \theta = k/k = \sqrt{1 - (k_x/k)^2}$ määräämään suuntaan θ . Säteilyimpedanssi on $Z_s = \rho c / \cos \theta = \rho c k / k_x$. Fourier-muunnettu säteilypaine saadaan helposti impedanssilla kertomalla

$$P(k_x, k_y) = U(k_x, k_y) \rho c k / k_x \quad (3)$$

ja painejakautuma $p(x, y)$ rekonstruoidaan käänteis-Fourier-muunnoksella.

Värähtelymuodon säteily on tehokasta eli säteily(hyöty)suhde on lähellä ykköstä kriittisen eli koinsidenssitaajuuden f_c yläpuolella, jonka kohdalla muodon rakenteellinen ja äänikentän akustinen aaltoluku ovat yhtä suuret. Värähtelymuodot, joilla on äärellinen vaimennus, voidaan herättää ja pakottaa säteilemään paitsi resonanssitaajuudellaan, myös millä tahansa muulla taajuudella. Herätteen laadusta riippuen maksimisäteilyn ei tarvitse tapahtua resonanssitaajuudella tai edes kriittisen taajuuden yläpuolella. Kuva 3 esittää kuvan 2 muodon laskettua säteilyä kolmella eri taajuudella. Muodon kriittisen taajuuden (482 Hz) yläpuolella koko pinta säteilee tehokkaasti, alapuolella säteily tapahtuu vain reunoista tai kulmista.

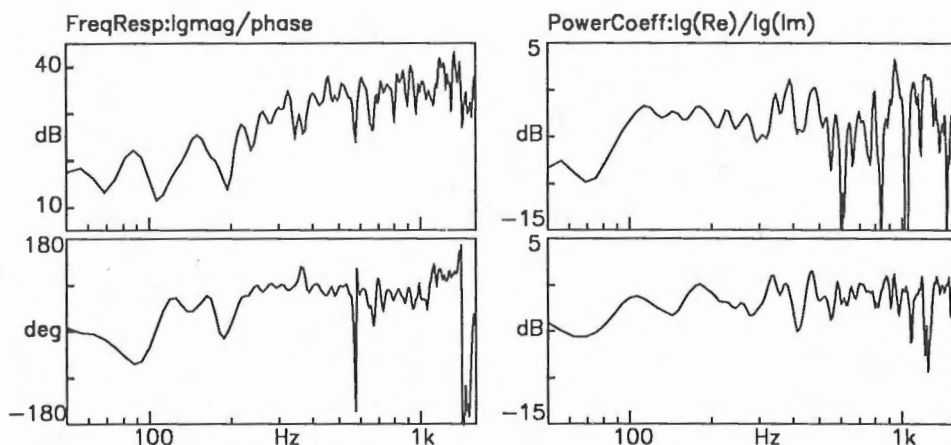


Kuva 4. Simuloitu tuleva painekenttä, joka koostuu kahdesta tasoaallost, ja sen aiheuttama yhdistetty muotojen (3,3) ja (4,2) vaste. Aalto 1: paine $p_1 = 0,5 + j0,5$ Pa, tulokulma $\theta = 38^\circ$; aalto 2: $p_2 = -1 + j0$ Pa, $\theta = 61^\circ$. Yhdistetty painejakautuma levyn pinnalla: (ylä) paikka-alueessa, (keski) aaltolukualueessa. (ala) Yhdistetty nopeusvaste.

Rakenteen vaste tulevalle äänikentälle

Elastisten rakenteiden tulevan äänikentän herättämän vasteen analyysi nojaa seuraavaan pääperiaatteeseen: pinnan reaktio synnyttää sekundäärisen säteilyn (sironneen) painekentän sen kentän lisäksi, joka esiintyy muuten vastaavalla mutta täysin jäykällä pinnalla. Todellinen kokonaiskenttä on näiden kahden osan, liikkumattoman pinnan paineen ja liikkuvan pinnan uudelleen säteilemän paineen, superpositio. Itse pinnan liike tapahtuu tämän kokonaiskentän aiheuttamana.

Kunkin äänen herättämän värähtelymuodon nopeuden $u(x,y)$ ratkaisu on 3-ulotteinen konvoluutio, jonka dimensiot ovat paikan x ja y sekä taajuus. Muodon herääminen riippuu tulevan painekentän ja muodon nopeuden jakautumien kolminkertaisesta keskinäisestä peittymisestä. Tämäkin matemaattisesti raskas ratkaisu voidaan saattaa FFT:llä laskettavaan muotoon [1]. Kuvassa 4 nähdään numeerinen simulointiesimerkki kahden lähekkäisen muodon yhdistetystä nopeudesta, jonka aiheuttaa kaksi eri suunnista saapuvaa harmonista ja koherenttia tasoaaltoa. Yksinkertaisesti tunnetun neliömäisen levyn parametrit vastaavat 5 mm paksua lasilevyä. Kaksi moodia, (3,3) and (4,2), joiden resonanssitaajuudet ovat 82 ja 91 Hz (kriittiset taajuudet 1,44 ja 1,52 kHz), valittiin tarkasteltaviksi; laskenta-taajuus oli 87 Hz. Todellisessa mittauksessa nopeusjakautumien summa on ainoa havaittava tulos; muotojen nopeuksia ei voida eritellä.



Kuva 5. Intensiteettimenetelmällä mitattu impedanssi: (vasen) 1. lasin keskimääräinen impedanssi tulevan äänikentän suuntaan, (oikea) 2. lasin normalisoitu säteilyimpedanssi.

Läpäisy

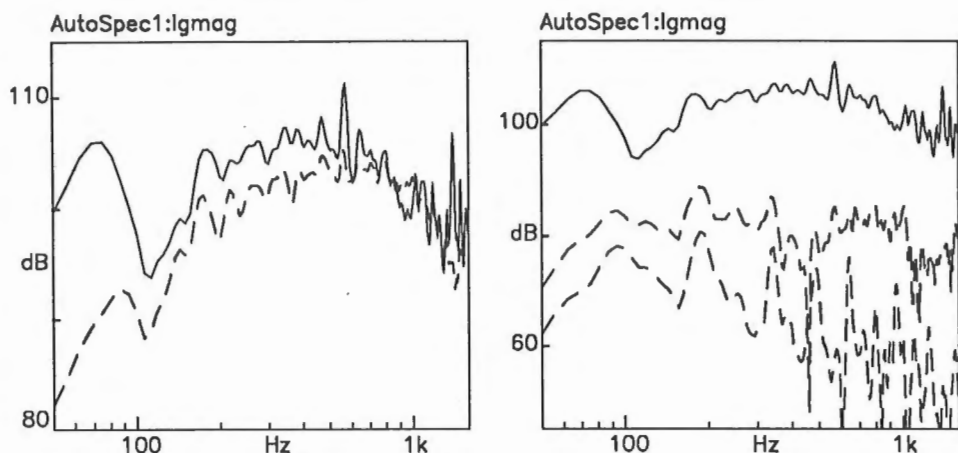
Rakenteen eristystä kuvaa sen tehöläpäisyysuhde $\tau(f)$, joka määritellään rakenteen säteilemän äänitehon ja siihen kohdistuvan, tulevan äänitehon suhteena. Perinteinen eristyksen teoria käsittelee äärettömästi elastista tasolevyä ja yhtä (vinosta kulmasta) tulevaa tasoaaltoa. Ratkaisuun riittää levyn mekaanisen impedanssin tunteminen. Kriittisen taajuuden alapuolella pätee tunnettu yksinkertaisempi massalaki. Kukin tuleva tasoaalto aiheuttaa yhden läpimenevän tasoallon. Kaksinkertainen levy on tärkeä käytännön tapaus, jolle myös tunnetaan ratkaisu, kun levyt ovat äärettömiä [8].

Klassisen tarkastelun puutteena on se, että äärettömiä levyjä ei ole olemassa. Äärellisillä levyillä kukin tulevan kokonaiskentän tasoaltokomponentti $P_i(k_x, k_y)$ synnyttää oman säteilykenttensä $P_\sigma(k_x, k_y)$, joka koostuu monista tasoaloista, jotka diffraktoituvat eri suuntiin. Tehöläpäisyysuhteeksi tulee

$$\tau = \frac{\iint_{k_{xy} < k} |U(k_x, k_y)|^2 \frac{1}{k_z} dk_x dk_y}{\iint_{k_{xy} < k} |P_i(k_x, k_y)|^2 k_z dk_x dk_y} \quad (4)$$

Tämä lauseke on äärimmäisen monimutkainen, koska levyn vasteen nopeus $U(k_x, k_y)$ on jopa erikoistapauksessa, jossa muodot ovat harvassa, muotoa

$$U = F \left[\sum_m \frac{\iint_{k_{xy} < k} 2 P_i(k_x, k_y) \Psi_m^*(k_x, k_y) dk_x dk_y}{Z_m - 2 \iint_{-\infty}^{\infty} |\Psi_m(k_x, k_y)|^2 \frac{\rho c k}{k_z} dk_x dk_y} \Psi_m(x, y) \right] \quad (5)$$



Kuva 6. Suoraan mitattu tulevan kentän intensiteetti (ehyt viiva) sekä (vasen) perinteinen tulevan intensiteetin paineen kaksinkertaistumiseen perustuva estimaatti, (oikea) tavalliset intensiteetit (absorboitunut ja läpimennyt) ikkunan kummallakin puolella.

missä $F[\]$ on 2-ulotteinen Fourier-muunnos ja Z_m muodon m yleistetty moodi-impedanssi. Nähdään, että eristävyys on funktio sekä levyn ominaisuuksista että tulevan äänikentän määrätystä muodosta. Toisin sanoen yksikäsitteistä rakenteen äänieristävyyttä ei ole olemassa rakenteen omana riippumattomana ominaisuutena; eristävyys on aina rakenteen ja sen herättävän äänikentän yhteinen ominaisuus. Työläistä lausekkeista huolimatta eristys on laskettavissa sekä tässä että monikerroksisissakin tapauksessa jälleen tietokoneessa FFT:n avulla. Viitteessä [1] on esitetty kuvien 2-4 levyn ja äänikentän simuloituja eristyksiä eri taajuuksilla ja muodoilla.

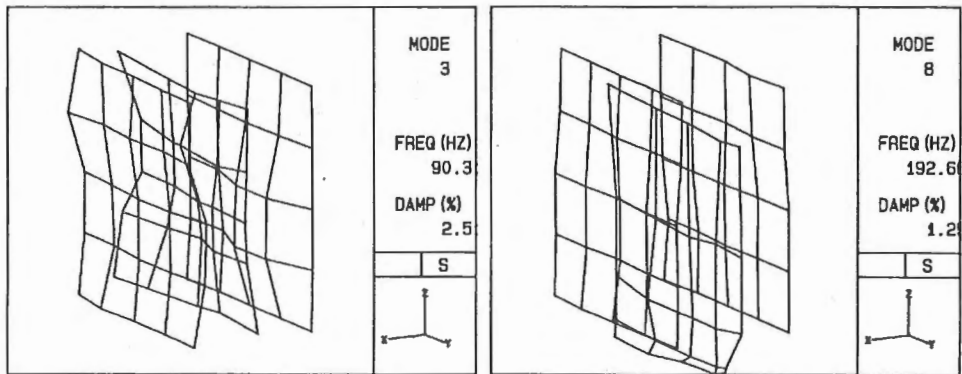
MITTAUS- JA LASKENTAMENETELMIÄ

Tässä artikkelissa kuvataan mittauksia yhdentyypisellä äänikenttähäritteellä, kohtisuoraan tulevalla pulssimaisella tasoaallolla. Tuloksia esitetään ikkunan värähtelymuotovasteesta ja sen säteilemästä kentästä taajuuksilla, joilla eristävyys oli alhainen. Menetelmäkokoelma perustuu pitkälti akustisen impedanssin mittaukseen intensiteettitekniikalla. Menetelmiä ja kokeita on kuvattu tarkemmin viitteessä [1], yhdessä muilla vastaavilla menetelmillä ja muilla koekappaleilla tehtyjen mittausten kanssa.

Impedanssin ja tulevan tehon määrittäminen

Ikkunan pinnan impedanssi tulevan äänikentän puolella ja säteilyimpedanssi toisella puolella mitattiin intensiteettitekniikkaan perustuvilla uusilla menetelmillä [1]. Akustinen kahden mikrofonin menetelmä, jonka tiedettiin toimivan hyvin perustilanteessa absorboivalla (mineraalivillan) pinnalla, joutui nyt vaativampaan kokeeseen.

Tavalliset intensiteettimittaukset ikkunan molemmilla puolilla tuottavat ikkunan *absorboiman* tehon ensimmäisellä puolella ja säteilemän tehon toisella. *Tulevan kentän*



Kuva 7. Kaksi ikkunan värähtelymuotoa, jotka samalla vastaavat eristävyyden minimikoh-
tia. Keskikerros on muotojen akustinen osa, ilmahiukkasten liike lasien välissä. Muotojen
taajuudet: (vasen) 90, (oikea) 193 Hz.

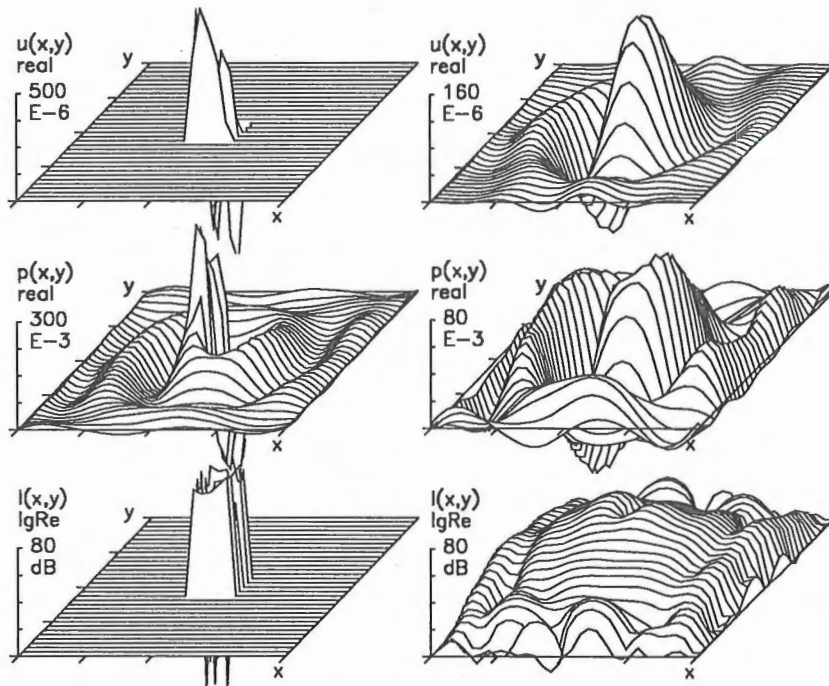
tehoa, jota tarvittaisiin läpäisy-suhteen eli äänieristävyyden määrittämiseen, ei saada näillä
mittauksilla selville. Tavallisesti vaaditaan lisäoletuksia tulevan äänikentän muodosta.
Viitteessä [1] esitettiin uusi menetelmä tulevan intensiteetin ja tehon suoraan mittaamiseen,
joka ei tarvitse mitään erillistä ennakkotietoa tulevasta kentästä. Menetelmä perustuu
kahden riippumattoman kompleksisen jakautuman määrittämiseen kohteena olevalla pin-
nalla (joko paine ja nopeus tai kaksi lähekkäistä painejakautumaa). Näistä tiedosta mene-
telmä ratkaisee tulevan tehon, käyttäen olennaisesti yhtälön (1) muotoa olevia lausekkeita.

Akustinen moodianalyysi

Suljettujen onteloiden akustisten värähtelymuotojen analyysi perustuu taajuusvasteiden
joukon määrittämiseen ontelon tilan kattavassa pisteverkossa. Tässä tapauksessa taajuus-
vasteet olivat hiukkasnopeuden vasteita paineherätteelle; admittanssityyppisen vasteen
valinta oli luonnollinen, koska herätekenttä oli (lähes) vapaa ja samalla tarjoutui mahdol-
lisuus yhdistää ilmapälin akustinen moodianalyysi lasien värähtelyn tavalliseen rakenne-
dynamiikan moodianalyysiin. Hiukkasnopeuden kaikki kolme komponenttia määritettiin
lasivälissä kahden mikrofoniin intensiteettitekniikalla. Rakenteiden moodianalyysin vakio-
laitteistoa ja -ohjelmistoa voitiin soveltaa akustistenkin moodien tunnistamiseen.

Säteilyn holograafinen analyysi

Ikkunan säteilyominaisuuksien kuvauksen täydennykseksi voitiin toisen lasin kompleksi-
nen nopeusjakautuma lopuksi prosessoida säteilyn kentän paineen ja intensiteetin 3-
ulotteiseksi kentäksi. Tämä tapahtuu akustisen lähikenttä holografian avulla. Koko säteily-
kentän rekonstruointiin ei tarvita mitään muita lähtötietoja. Ikkunaa ympäröivä seinä
oletettiin jäykäksi. Näytteenotossa käytetty heijastusten poisto ikkunoimalla merkitsi sitä,
että konstruoitu kenttä on vapaa eli se vastaa koko kentän suoraan säteilyä osaa.



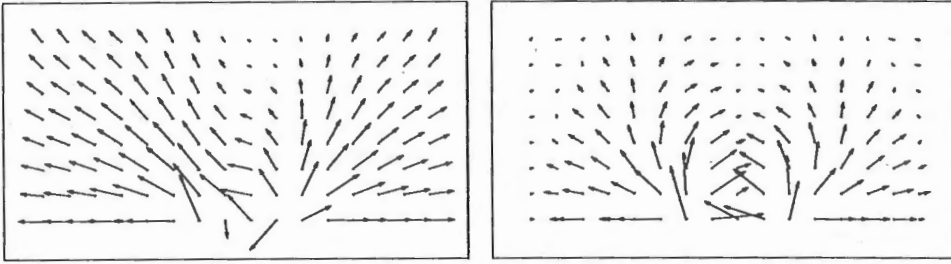
Kuva 8. Esimerkit laskennan välivaiheista edettäessä intensiteetin virtauskarttoihin: (ylä) nopeus, (keski) paine, (ala) intensiteetti; (vasen) ikkunan pinnalla, (oikea) 60 cm ikkunan pinnan etupuolella. (Vasen yläkuva) alunperin mitattu ikkunalasin nopeusjakautuma; taajuus 194 Hz, resoluutio 20 cm; vain reaali-osat on esitetty kompleksisista jakautumista.

KOKEITA

Koejärjestelyt

Ikkuna oli asennettuna äänieristyslaboratorion koehuoneiden väliseen seinään. Jälkikaiuntaa ei kuitenkaan päästetty mukaan tässä kuvattuihin analyyseihin; heijastukset leikattiin pois signaalianalyysin ikkunoinnilla. Herätteenä käytetty kohtisuoraan tuleva pulssimainen tasoalto on deterministinen. Tämän ansiosta voitiin soveltaa referenssisignaalia käyttävää yhden anturin taajuusvastemenetelmää. Referenssi saatiin äänilähteenä olleesta kaiuttimesta.

Yksikanavaisella perättäisellä näytteenotolla voitiin määrittää kompleksiset kenttäjakautumat (nopeus ja paine) ikkunan molemmilla pinnoilla, ja näistä voitiin jatkaa edelleen tulevan tehon mittaamiseen, moodien tunnistamiseen ja säteilykentän rekonstruointiin holografialla. Sekä akustista että pintaintensiteetin mittaustilastetta käytettiin näytteenotossa. Mittauspisteverkot koostuivat 5×5 pisteestä ikkunan molemmilla ulkopinnoilla ja kolmannesta verkosta ikkunan sisällä lasien välissä.



Kuva 9. Holograafisesti konstruoidut intensiteetin virtauskartat säteilylle kentälle taajuudella 194 Hz; vaakatasossa, joka sivuaa ikkunan symmetria-akselia, nähtynä ylhäältä. Ikkuna sijaitsee alarivin nuolien tasalla. Verkon resoluutio: 20 cm, nuolien dynamiikka-alue: 25 dB. Intensiteetin osa: (vasen) aktiivinen, (oikea) reaktiivinen.

Tuloksia

Ikkunan pintojen impedanssit on esitetty kuvassa 5. Tulevan äänen puolella ikkuna oli vähintään 20 dB kovempi kuin ilma yli 200 Hz taajuuksilla, mikä merkitsee sitä, että sen pinnalla paine likimain kaksinkertaistuu. Säteilyimpedanssi oli lähellä ykköstä useimmilla taajuuksilla — poiketen tavallisesta äärettömien levyjen teorian oletuksesta. Impedanssin määrittäminen kaksimikrofoniteknikalla epäonnistui tulevan äänen puolella, mutta oli hyvässä sopusoinnussa suoran menetelmän kanssa toisella puolella.

Uudella menetelmällä suoraan mitattu tuleva intensiteetti oli kohtuullisen lähellä tavanomaista paineen kaksinkertaistumiseen perustuvaa estimaattia (kuva 6). Ero oli oikeaan suuntaan, eli tavanomaisen menetelmän tiedetään tuottavan liian pienen arvon pienillä taajuuksilla. Kuvan 6 oikeanpuoleisen ruudun ylimmän ja alimman käyrän ero on ikkunan äänieristävyys. Sillä on minimiarvoja mm. taajuuksien 90 ja 194 Hz tienoilla. Kävi ilmi, että eräät ikkunan voimakkaimmat värähtelymoodit olivat näillä taajuuksilla. Niiden muodot on esitetty kuvassa 7. Holografian tarjoamista monipuolisista mahdollisuuksista on esimerkkinä kuva 8, mikä kuvaa säteilyn kentän prosessointia jälkimmäisellä taajuudella. Rekonstruoinnin lopputulos, äänikentän intensiteetikartat on esitetty kuvassa 9, mistä nähdään suuri reaktiivinen pyörre ikkunan edessä ja epäsymmetrinen aktiivisen tehon säteily vinoon suuntaan (vaikka tuleva äänikenttä oli kohtisuora).

LOPPUHUOMAUTUKSET

Laskentaosassa esitetyn simuloinnin avainominaisuus on sen numeerinen luonne; lähtötietojen ei suinkaan tarvitse olla analyttisiä, ideaalisten mallien tuottamia. Mitä tahansa geometriaa sekä mitä tahansa värähtelymuotoja ja reunaehtoja voidaan käyttää. Lähtötiedot voivat hyvin olla muiden numeeristen menetelmien tai mittausten tuottamia.

Mittausten tulokset osoittivat, että tulevan intensiteetin suora mittausten menetelmä oli hyvässä sopusoinnussa tunnetun riippumattoman menetelmän kanssa. Muut esitetyt analyysit ovat luonteeltaan lähinnä kvalitatiivisia. Ne kykenivät valaisemaan ikkunan ominaisuuksia ja käyttäytymistä, jotka eivät tule näkyviin tavallisemmilla äänieristyksen mittausten ja analyysimenetelmillä.

VIITTEET

1. LAHTI, T., Analysis methods for acoustical systems based on the FFT and intensity techniques. Väitöskirja, TKK Sähkötekniikan osasto. Espoo 1990, *Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Publications* 67, 288 s.
2. CROCKER, M.J., RAJU, P.K. & FORSSEN, B., Measurement of transmission loss of panels by the direct determination of transmitted acoustic intensity. *Noise Control Eng. J.* 17(1981)1, 6–11.
3. CAPEO, J.A. & TRETHERWEY, M.W., An experimental acoustical modal analysis technique for the evaluation of cavity characteristics. *INTER-NOISE 84*. Honolulu, 3–5.12.1984, ss. 1367–1370.
4. MAYNARD, J.D., WILLIAMS, E.G. & LEE, Y., Nearfield acoustic holography. I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *J. Acoust. Soc. Am.* 78(1985)4, 1395–1413.
5. CREMER, L., HECKL, M. & UNGAR, E.E., *Structure-borne sound. Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. 2. p. Berliini 1988, Springer. 573 s.
6. FAHY, F.J., *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Lontoo 1985, Academic Press. 309 s.
7. JUNGER, M.C. & FEIT, D., *Sound, structures and their interaction*. 2. p. Cambridge 1986, MIT Press. 448 s.
8. LONDON, A., Transmission of reverberant sound through double walls. *J. Acoust. Soc. Am.* 22(1950)2, 270–279.
9. MAIDANIK, G., Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. *J. Acoust. Soc. Am.* 34(1962)6, 809–826. Erratum: *J. Acoust. Soc. Am.* 57(1975)6(II), 1552.
10. SMITH, P.W., Jr., Response and radiation of structural modes excited by sound. *J. Acoust. Soc. Am.* 34(1962)5, 640–647.
11. KIHLMAN, T., Sound radiation into a rectangular room. Application to airborne sound transmission in buildings. *Acustica* 18(1967)1, 11–20.
12. SEWELL, E.C., Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *J. Sound Vib.* 12(1970)1, 21–32.
13. WALLACE, C.E., Radiation resistance of a rectangular panel. *J. Acoust. Soc. Am.* 51(1972)3(2), 946–952.
14. GUYADER, J.L. & LESUEUR, C., Transmission of reverberant sound through orthotropic, viscoelastic multilayered plates. *J. Sound Vib.* 70(1980)3, 319–332.
15. SHEN, Y. & OLDHAM, D.J., Sound radiation from building elements. *J. Sound Vib.* 84(1982)1, 11–33.
16. GAGLIARDINI, L., ROLAND, J. & GUYADER, J.L., Calculation of the transmission loss of multiple-panel walls using a modal method. *Proceedings of the 12th ICA, International Congress on Acoustics*. Toronto, 24–31.7.1986. Vol. 2, E1–4. 2 s.

Tapio Lahti, tekn.tri., Suomen Akustiikkakeskus Oy, Espoo